

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова

На правах рукописи



Виноградова Галина Сергеевна

**МЕТОДИКА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО КОМПОНОВОЧНОГО
РЕШЕНИЯ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ АТОМНЫХ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

Специальность 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка
информации (в технике и технологиях)»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидат технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, доцент
Марков Андрей Валентинович

Санкт-Петербург - 2017

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОЦЕССА КОНСТРУКТОРСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ	10
1.1.Особенности проектирования насосного оборудования для атомных электростанций	10
1.2 Международные требования управления качеством процесса проектирования и разработки насосного оборудования	27
1.3 Исследования в области выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования.....	31
1.4 Выводы к главе 1	35
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО КОМПОНОВОЧНОГО РЕШЕНИЯ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ	36
2.1 Анализ объекта исследований	36
2.2 Математическая постановка задачи исследования и ее решение	49
2.3 Алгоритм выбора оптимального компоновочного решения	62
2.4 Выводы к главе 2	78
ГЛАВА 3 РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО КОМПОНОВОЧНОГО РЕШЕНИЯ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ	80
3.1 Реализация алгоритма работы программного обеспечения	80
3.2 Алгоритм работы пользователя с программным обеспечением	83
3.3 Выводы к главе 3	94
ГЛАВА 4 АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО КОМПОНОВОЧНОГО РЕШЕНИЯ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ	95
4.1 Результаты апробации	95
4.2 Рекомендации по применению разработанной методики	122
4.3 Выводы к главе 4	125
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	126

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	128
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	131
Приложение А Листинг «Программа по выбору компоновочного решения при проектировании технических систем»	143
Приложение Б. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ	157
Приложение В Акты внедрения	158
Приложение Г Стандарт организации «Верификация проекта оборудования»	160

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Доля электроэнергии, вырабатываемой атомными электрическими станциями (АЭС) ежегодно растет, заключаются контракты на строительство энергоблоков АЭС как в России, так и за рубежом. Государственной корпорацией по атомной энергии (ГК «Росатом») разработаны «дорожные карты», стратегическими целями которых является сооружение 16 энергоблоков в России (до 2020 г.) и 38 энергоблоков в других странах (до 2030 г.). Высокая конкуренция на мировом рынке в области проектирования и сооружения блоков АЭС задает жесткие требования к качеству продукта – проекта блока АЭС. В целях повышения конкурентоспособности российского проекта станции разработчики стремятся снизить сроки ввода в эксплуатацию каждого нового блока АЭС, но при сокращении срока ввода проекта качество, надежность и безопасность российских проектов АЭС должны быть на заданном уровне. Требования по безопасности и качеству проекта АЭС регулируются на национальном уровне (Ростехнадзор РФ) и на международном уровне (МАГАТЭ, STUK, ASME и другие международные организации). На сокращение ввода АЭС в эксплуатацию влияет множество факторов, в том числе выбор и утверждение проекта станции и конструкции применяемого оборудования, в том числе конструкции главного циркуляционного насоса, далее – насосного оборудования (НО).

Степень разработанности темы. Проблема выбора конструкции оборудования на начальном этапе конструкторского проектирования это проблема принятия решения. Проблема принятия решения рассматривается в трудах ИСА РАН, СПИИРАН и работах отечественных и зарубежных ученых и исследователей: Г. Саймона, Т. Саати, Р. Акоффа, С. Янга, Х. Райфа, Э. Мушкиа, П. Мюллера, О.И. Ларичева, Е.П. Голубкова, А. Г. Венделина, Ю.Ю. Екатеринославского, Ю.Ф. Мартемьянова, Т.Я. Лазаревой, С.Я. Егорова, А.В. Белова и других ученых. Анализ этих работ позволяет сделать вывод, что предложенные методики необходимо адаптировать к специальному процессу

конструкторского проектирования НО для АЭС. Проблема выбора компоновочного решения НО в отрасли атомной энергетики исследована мало, однако можно отметить работу Э.Г. Новинского. «Исследования по созданию главных циркуляционных насосов для АЭС и ЯЭУ». В этой работе рассматриваются конструкторские решения на этапе отработки уже выбранной компоновки насосного оборудования для циркуляции натриевого теплоносителя. В работе Э.Г. Новинского дается прогноз применения выработанных конструкторских решений новых НО для циркуляции водяного теплоносителя, вопрос выбора компоновочного решения НО не рассматривается с точки зрения выполнения новых требований МАГАТЭ и ИСО: верификация проекта и управление рисками при проектировании и разработке.

Новые международные и национальные требования к качеству процесса конструкторского проектирования насосного оборудования с одной стороны и недостатки подхода к управлению качеством процесса конструкторского проектирования насосного оборудования, заключающиеся в отсутствие квалиметрической модели для оценки результата процесса, с другой стороны обосновывают актуальность разработки квалиметрической модели и методики выбора оптимальной компоновки насосного оборудования.

Работа выполнена в рамках «Дорожной карты до 2020» ГК «Росатом». Реализация предложенной методики способствует выполнению программы развития атомной промышленности России (паспорт программы Инновационного развития и технической модернизации Госкорпорации «Росатом» на период до 2020 года (в гражданской части), являющейся важным звеном реализации проектов Комиссии при президенте РФ по модернизации и технологическому развитию экономики России (создана указом президента РФ от 20.05.2009 № 579).

Цель и задачи исследования. Целью диссертационного исследования является улучшение процесса конструкторского проектирования насосного оборудования путем создания квалиметрической модели оценки компоновочного решения и методики выбора оптимального компоновочного решения насосного

оборудования. Для достижения поставленной цели диссертационного исследования необходимо было решить следующие задачи:

- проанализировать этапы процесса конструкторского проектирования насосного оборудования и определить этап, требующий улучшения;
- уточнить перечень показателей качества, характеризующих компоновочное решение насосного оборудования;
- адаптировать современные квалиметрические инструменты для решения задачи выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования;
- разработать алгоритм выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования с оценкой рисков, возникающих при подготовке проектной документации;
- разработать программное обеспечение реализующее алгоритм оптимального выбора компоновочного решения насосного оборудования;
- разработать стандарт организации «Верификация проекта оборудования» реализующий методику выбора оптимального компоновочного решения.

Объект исследования - характеристики насосного оборудования для АЭС.

Предмет исследования - теоретические и методические вопросы выбора оптимального проекта компоновочного решения насосного оборудования.

Научная (научно-техническая) задача – разработка методики, позволяющей снизить риск утверждения неоптимального компоновочного решения насосного оборудования.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- в результате системного анализа процесса конструкторского проектирования уточнен стандартизированный состав основных показателей качества, характеризующих компоновочное решение насосного оборудования на начальном этапе технического проектирования, стандартизированная группа «показателей назначения» дополнена показателем «коэффициент

быстроходности», позволяющим проводить сравнительную оценку различных типов центробежных насосов;

- впервые разработана квалиметрическая модель оценки синтезированного компоновочного решения насосного оборудования с применением адаптированного квалиметрического инструмента качества – функции желательности Харрингтона, позволяющая более точно устанавливать соответствие между натуральными значениями показателей в физических шкалах и психофизическими параметрами (субъективными оценками «ценности» этих значений);
- разработан новый алгоритм выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования с оценкой рисков по критерию Сэвиджа, позволяющий сделать выбор, который приведет к наименее тяжелым последствиям, если выбор окажется ошибочным.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость научных положений изложенных в работе состоит в следующем:

- расширена стандартизированная группа «показателей назначения», характеризующих насосное оборудование;
- разработана квалиметрическая модель оценки компоновочного решения насосного оборудования;
- разработан алгоритм оценки рисков на начальном этапе технического проектирования.

Практическая значимость работы состоит во внедрении и использовании основных положений, выводов и рекомендаций, полученных при исследовании процесса конструкторского проектирования насосного оборудования.

Практическую значимость работы представляют:

- реализация предложенного алгоритма выбора оптимального компоновочного решения в программном обеспечении;
- верифицированный алгоритм выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования на начальном этапе технического

проектирования, который может быть применен при конструировании ремонтируемой продукции в отрасли машиностроение;

- разработанные рекомендации по применению методики при решении задач выбора оптимального компоновочного решения ремонтируемой продукции.

Методология и методы исследования. Поставленная цель достигнута путем проведения теоретических и экспериментальных исследований. В работе применены методы: теории анализа процессов; теории математического моделирования; математические методы поддержки принятия решений; современные инструменты квалиметрической оценки качества.

Положения, выносимые на защиту:

- уточненный состав показателей качества, характеризующих компоновочное решение насосного оборудования;
- квалиметрическая модель оценки синтезированного компоновочного решения насосного оборудования с применением функции желательности Харрингтона;
- алгоритм выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования с оценкой рисков при подготовке проектной документации по критерию Сэвиджа;
- результаты экспериментальных исследований в условиях реального производства предлагаемой методики выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования для АЭС.

Степень достоверности результатов. Достоверность и обоснованность научных положений и результатов работы обусловлены: применением общепринятого математического аппарата теории принятия решений; выбором показателей качества с использованием нормативно-технических документов; применением статистических данных из официальных источников; публикаций и обсуждением основных результатов диссертационного исследования. Основные теоретические результаты подтверждены актами внедрения результатов диссертационной работы в реальное производство и учебный процесс университета.

Апробация результатов. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: международной научно-практической конференции «Шаг в будущее: научный и практический опыт развития, научные гипотезы, новизна и апробация результатов исследований...», 7-8 мая 2015г. (г. Санкт-Петербург); VI научно-технической конференции молодых ученых и специалистов атомной отрасли «Команда 2015», с 08-11 июня 2015г. (г. Санкт-Петербург); международной научно-практической конференции «Инновации в формировании стратегического вектора развития фундаментальных и прикладных научных исследований» 21-22 ноября 2015г. (г. Санкт-Петербург); XXI всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: Эффективность, надежность, безопасность», ноябрь 2015г. (г. Томск); XI Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, апрель 2016 (г. Иваново); VIII Общероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос» (БГТУ «ВОЕНМЕХ», (г. Санкт-Петербург).

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликованы 10 печатных работ, в том числе в трех изданиях, рекомендуемых ВАК, получено одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Основные научные результаты получены автором самостоятельно в рамках, проведенных им, теоретических и практических исследований.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и четырех приложений. Содержание работы изложено на 176 листах машинописного текста, включая 35 рисунков и 29 таблиц. Список литературы включает 121 библиографический источник.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПРОЦЕССА

КОНСТРУКТОРСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

1.1 Особенности проектирования насосного оборудования для атомных электростанций

В наши дни развитые и развивающиеся страны осознают необходимость освоение отрасли атомная энергетика. Самые сдержанные прогнозы говорят о том, что в перспективе 2030 года на планете будет эксплуатироваться до 500 энергоблоков (для сравнения, сейчас их насчитывается 448).

Атомные электростанции России вносят ощутимый вклад в сохранение климата. Так, например, благодаря работе атомных станций России выброс углекислого газа в объеме 210 миллионов тонн предотвращается ежегодно. Всего же мировая атомная энергетика предотвращает образование 3,4 миллиардов тонн CO₂: около 900 миллионов тонн в США, 1,2 миллиардов тонн — в Европе, 440 миллионов тонн — в Японии, 90 миллионов тонн — в Китае.

В настоящее время (данные апреля 2017 года) в нашей стране эксплуатируется 10 атомных электростанций, общее количество энергоблоков 35. В США эксплуатируется 63 атомные электростанции, общее количество энергоблоков - 104. В Европе самое большое число энергоблоков находящихся в эксплуатации во Франции - 58 энергоблоков. В азиатско-тихоокеанском регионе самое большое число энергоблоков эксплуатируется в Японии – 54 энергоблока.

Крупнейшая в мире АЭС — это Kashiwazaki Kariva (Япония) мощностью 8200 МВт (5 реакторов типа BWR и 2 реактора ABWR суммарная мощность которых составляет 8212 МВт). Запорожская атомная электростанция, расположенная в Украине, является самой крупной в Европе, ее мощность составляет 6000 МВт (6 реакторов ВВЭР-1000). В России наибольшую мощность имеют Балаковская, Ленинградская, Калининская и Курская АЭС (по 4 реактора

мощностью 1000 МВт каждый), в конце 2016 года введен в промышленную эксплуатацию первый блок Нововоронежской АСЭ-2 (реактор мощностью 1200 МВт).

Согласно базе данных МАГАТЭ по энергетическим реакторам (PRIS) на начало 2017 года в мире эксплуатировались 448 ядерных энергоблоков общей мощностью 391 774 МВт.

Атомная отрасль России является одним из мировых лидеров по уровню научно-технического развития в таких направлениях как: проектирование реакторов; эксплуатация атомных электростанций; изготовление и поставка ядерного топлива; высочайшая квалификация персонала атомных станций.

В 1954 году впервые в мире в нашей стране была введена в эксплуатацию атомная электростанция и разработано и произведено ядерное топливо для неё. Российская атомная отрасль имеет самые совершенные в мире обогатительные технологии. Свою надежность в процессе безаварийной работы в тысячи реакторо-лет доказали проекты блоков атомных электростанций с водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР).

По данным на апрель 2017 года в нашей стране эксплуатируется 10 атомных электростанций (в общей сложности 35 энергоблоков установленной мощностью 27,9 ГВт), которые вырабатывают около 18,3% всего производимого электричества в стране. При этом в Европейской части России доля атомной энергетики достигает 30%, в Северо-Западном регионе — 37%.

Организационно все АЭС являются филиалами АО «Концерн Росэнергоатом», входят в состав подконтрольного Госкорпорации «Росатом» АО «Атомэнергопром».

АО «Атомэнергопром» является второй в Европе энергетической компанией по объему генерации атомной генерации, уступая лишь французской EDF [1-48].

Проектирование, разработка и ввод в эксплуатацию современных атомных электростанций

Одной из важнейших задач инновационного развития Госкорпорации «Росатом» является повышение конкурентоспособности оказываемых услуг и

продукции поставляемой на мировой рынок атомной энергетики. Решение этой задачи достигается путем технического перевооружения производственных организаций входящих в контур корпорации и за счет внедрения новых технологий. Различные формы развития инноваций применяются в деятельности Государственной корпорации по атомной энергии. Инновационное развитие в большей степени осуществляется путем развития собственных технологий и компетенций.

В рамках инновационной деятельности Госкорпорация «Росатом» является одним из заказчиков Федеральной целевой программы «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010 - 2015 годов и на перспективу до 2020 года». Программа инновационного развития и технической модернизации Госкорпорации «Росатом» разработана на период до 2020 года (в гражданской части) [49].

В результате реализации программы инновационного развития в настоящее время разработан типовой реактор на 1150 МВт электрической мощности. Работы по созданию нового проекта реактора получили название проект «АЭС-2006». По данным на апрель 2017 Госкорпорация «Росатом» сооружает восемь новых энергоблоков в России. В зарубежных странах на настоящее время ведется строительство 34 энергоблоков атомных станций, включая Белорусскую АЭС (Беларусь), вторую очередь АЭС «Таяньвань» (Китай) АЭС «Аккую» (Турция), и другие [1].

Основные целевые показатели в техническом задании на ВВЭР-1200 следующие:

- тепловая мощность реактора – 3200 МВт;
- срок службы незаменяемого оборудования – 60 лет;
- коэффициент использования установленной мощности (КИУМ), усреднённый за весь срок службы АЭС – 90%;
- годовой коэффициент технического использования, усреднённый за весь срок службы – 92%.

Чтобы обеспечить высокие показатели эффективности и готовности энергоблока АЭС, соответствующий специализированный машинный зал также должен быть рассчитан на высокую производительность и надёжность при соответствии времени техобслуживания программы перегрузки топлива и техобслуживания реактора [50]. Таким образом, ядерные реакторы с водяным теплоносителем являются основой развития ядерной энергетики России в ближайшие десятилетия. В энергетических установках с такими реакторами важнейшую роль в технологическом цикле преобразования внутриядерной энергии в электрическую играют процессы теплопередачи, тепло- и массопереноса, осуществляемые с помощью циркулирующих потоков воды.

О масштабах этих потоков можно судить по таким цифрам расход воды, циркулирующей в первом контуре ВВЭР-1000, составляет $80\ 000\ м^3/ч$, а расход в системе технического водоснабжения $200\ 000\ м^3/ч$ (для сравнения укажем, что средний расход воды в р. Днепр у г. Смоленска равен $360\ 000\ м^3/ч$).

Для блока мощностью 1200 МВт, (ВВЭР-1200) в зависимости от температуры охлаждающей воды и результатов оптимизации циркуляционной системы может потребоваться расход воды от $108000-252000\ м^3/ч$. Чтобы наглядно представить порядок величины, для электростанции проекта «АЭС-2006» с двумя реакторами при прямоточном охлаждении потребуется полный летний расход р. Сена [51].

Движение таких больших потоков воды по многочисленным, в основном замкнутым контурам со сравнительно большими скоростями осуществляется с помощью насосного оборудования, установленная мощность которого достигает 12 % мощности энергоблока, а потребляемая энергия составляет от 70 до 90 % энергии, расходуемой на собственные нужды АЭС. Удельные расходы технической воды на АЭС в 1,5—2 раза больше, чем на ТЭС. Те или иные нарушения потоков или отклонения их параметров от требуемых значений приводят в лучшем случае к снижению экономичности блока, а чаще создают аварийные ситуации. Внеплановые простои АЭС мощностью 1000 МВт в течение одного дня обходятся государству в сотни тысяч рублей, а ущерб, связанный с

недодачей в сеть 1% электроэнергии из-за неоптимальных режимов работы агрегатов АЭС, составляет около 3 млн. руб. в год.

Однако как бы ни впечатляющи были экономические оценки, главное внимание при строительстве и эксплуатации АЭС уделяется проблеме ядерной и радиационной безопасности. Это вызвано тем, что ядерная энергия — потенциально наиболее опасный вид энергии из всех известных человечеству. Насосное оборудование АЭС выполняет технологические функции, непосредственно связанные с обеспечением ядерной и радиационной безопасности: с одной стороны, отказы некоторых насосов могут вызвать крупные аварии, а с другой — насосы являются важнейшими элементами различных систем безопасности.

Таким образом, при создании насосного оборудования для АЭС на первый план выдвигаются требования надежности, как в расчетных, так и в переходных режимах, включая аварийные. Эти требования в сочетании с особенностями эксплуатации, а также с другими требованиями, такими как радиоактивность первого контура, выделяют насосы АЭС в самостоятельную отрасль насосостроения. С точки зрения надежности насосы относятся к оборудованию с активным принципом действия, т.е. к оборудованию, сложному по конструкции и взаимосвязанному с другими устройствами, от которых зависит его работоспособность. Проблемы обеспечения надежности такого оборудования особенно сложны и актуальны. В связи с этим кратко рассмотрим основное оборудование энергоблоков с реакторами типа ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 [51].

Насосное оборудование первого контура

Традиционно, в контурах циркуляционной воды электростанции используются два вида насосов: главные циркуляционные насосы (ГЦН) и насосы с бетонной спиральной камерой (НБСК).

Главный циркуляционный насос

ГЦН — полностью металлические погружаемые в приямок насосы со средней скоростью вращения 1000 об/мин, которые поставляются полностью в

сборе, готовые к установке в насосной станции. Они могут быть рассчитаны на большие напоры - до 90 м вод.ст. и подачей $7200 - 46800 \text{ м}^3/\text{ч}$.

НБСК – насосы без приемника, с низкой скоростью вращения 120 -250 об/мин. Бетонная спиральная камера отливается на месте в начальной стадии монтажа, что требует тесной интеграции общестроительных работ. НБСК могут иметь напор до 30м вод. ст. Подача таких насосов очень велика – $108000 \text{ м}^3/\text{ч}$ и выше [52-57].

Важным элементом реакторного контура является главный циркуляционный насос (ГЦН). В системе мощной АЭС любого типа циркуляция теплоносителя в нормальной эксплуатации принудительная. Большая протяженность циркуляционного контура, составляющая, например, для каждой петли ВВЭР-1000 более 46 м, значительная скорость теплоносителя и стремление к компактности размещения оборудования приводят к значительным сопротивлениям, преодоление которых за счет естественной циркуляции возможно только при малой нагрузке — это и используется в аварийных ситуациях. ГЦН предназначен для работы при высоком давлении, но может работать и при низком — начиная с 2,0 МПа, что необходимо при пусковых операциях. Основное требование, предъявлявшееся к ГЦН в начале развития атомной энергетики, сводилось к полному отсутствию протечек, что существенно усложняло и удорожало конструкцию насоса. Такие герметичные ГЦН по стоимости составляли заметную долю стоимости всей станции. Рабочее колесо, электродвигатель и вал были герметизированы в общем корпусе, соединяющем трубопроводами контура. Недостатком этих насосов являлся также их низкий КПД 60-65%. Для уменьшения таких протечек разработаны механические уплотнения вала насоса и относительно несложные вспомогательные контуры уплотняющей воды. Эти насосы вдвое дешевле герметичных в основном за счет перехода к выносному электродвигателю обычного исполнения. КПД таких насосов на 12 — 15 % больше герметичных [52-57].

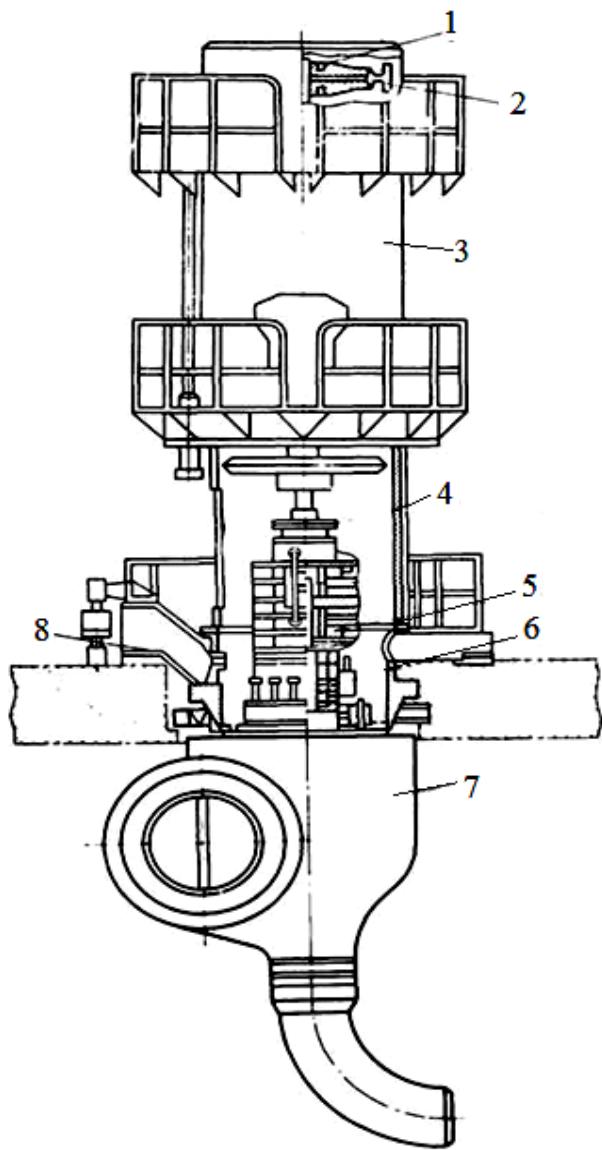


Рисунок 1 - Установка циркуляционного насоса большой производительности с маховиком ГЦН для АЭС с ВВЭР: 1 — вал электродвигателя; 2 — маховик; 3 — электродвигатель; 4 — соединительная муфта; 5 — радиально-упорный подшипник; 6 — узел уплотнения; 7 — корпус; 8 — опорные лапы.

Циркуляционные насосы с механическим уплотнением вала (рисунок 1) обеспечивают ограниченные утечки, возвращаемые обратно в контур, более стабильны и контролируемые в эксплуатации. Гидравлическая часть насоса состоит из эллиптического корпуса, проточной части с всасывающим и нагнетательным патрубками, одностороннего рабочего колеса, консольно-расположенного на валу ротора, направляющего аппарата и узлов уплотнения.

Насосное оборудование для АЭС имеет следующие вспомогательные системы (рисунок 2): масляную систему для подачи масла на смазку верхнего подшипника, состоящую из маслонасосов, маслоохладителей и фильтров; систему охлаждения элементов насосного агрегата и электродвигателя технической водой промежуточного контура; систему подпитки, предназначенную для запирания теплоносителя первого контура в зоне уплотнения вала насоса путем подачи в камеру уплотнения очищенного и дегазированного теплоносителя с давлением, превышающим давление в контуре. При этом часть уплотняющей воды через уплотнение поступает в контур, не допуская выхода наружу радиоактивной воды, а остальная часть сбрасывается в деаэратор подпитки контура для ВВЭР.

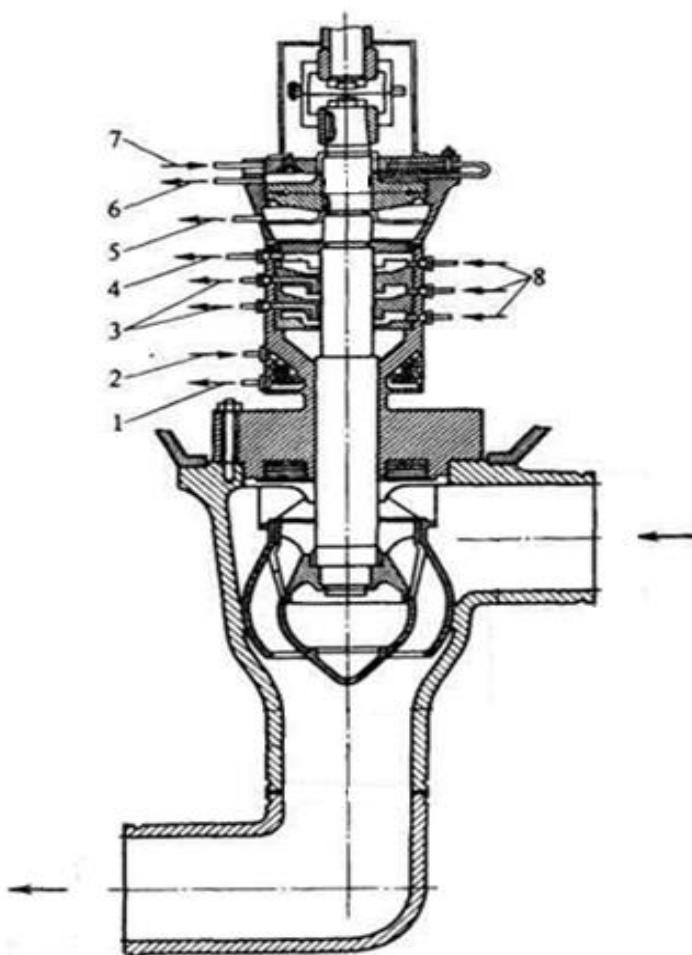


Рисунок 2 - Уплотнения циркуляционного насоса ГЦН: 1, 2 — отвод и подвод воды промконтура; 3 — отвод на дроссель; 4, 5 — сливы утечек воды и масла; 6, 7 — отвод и подвод масла; 8 — подвод запирающей воды.

Для предотвращения нарушения целостности оболочек тепловыделяющих элементов (твэлов) из-за перегрева необходима непрерывная циркуляция теплоносителя через активную зону не только при нормальном режиме, но и в аварийных ситуациях. Для продолжения циркуляции при временном обесточивании ГЦН с механическим уплотнением вала снабжают маховиком на валу электродвигателя насоса [52-57].

При прекращении электропитания это обеспечивает продолжительность работы насоса до полного останова более одной минуты. На рисунке 3 показано изменение подачи таких насосов с момента прекращения электропитания.

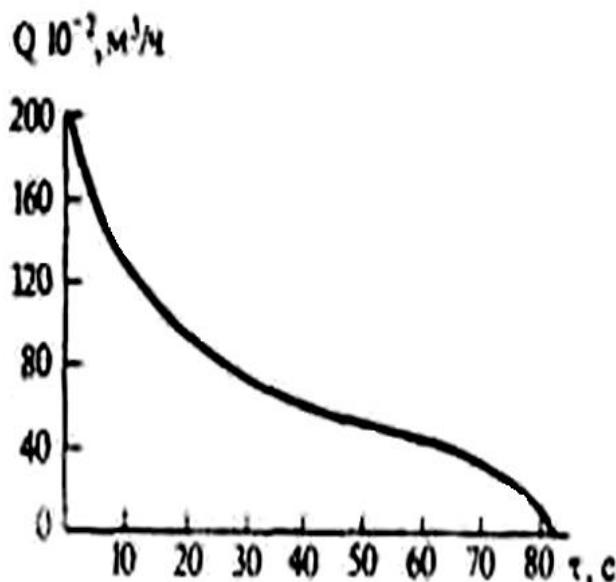


Рисунок 3 - Расход теплоносителя через ГЦН в зависимости от времени с момента прекращения электропитания

Из рисунка 3 видно, что в течение 30 с циркуляция теплоносителя еще достаточна — расход по контуру ВВЭР уменьшается в 2,7 раза, после чего начинается переход на естественную циркуляцию.

Основные данные для этих насосов приведены в таблице 1. Для энергоблока с реактором ВВЭР каждый ГЦН обслуживает свою петлю. Большой диаметр соответствующего ГЦН каждой петли делает ненужным установку резервного ГЦН. На один блок атомной станции поставляется четыре ГЦН. Насосы устанавливаются в главный циркуляционный трубопровод [52-57].

Эксплуатация АЭС с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 возможна не только при четырех работающих ГЦН, но и при трех, и даже двух ГЦН с соответствующим снижением мощности. Работа менее чем с двумя ГЦН не допускается [52-57].

Таблица 1 - Основные характеристики главных циркуляционных насосов для ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200

<i>Параметры</i>	<i>ГЦН для ВВЭР-1000, ВВЭР-1200</i>
Подача до, м ³ /ч	27000
Напор до, м	90
Давление на входе, МПа	16
Температура носителя, °С	300
Частота вращения (синхронная), об/мин	1000
Мощность ГЦН при работе в контуре, кВт	5250
Напряжение сети двигателя, В	10000
КПД агрегата (вnomинальном режиме), % не менее	76
Срок службы, лет	60
Работа без технического обслуживания, час	16000

Насосы с бетонной спиральной камерой

Альтернативой ГЦН являются насосы с бетонной спиральной камерой (НБСК). НБСК – насосы с низкой скоростью вращения 120-250 об/мин, в которых используется планетарный редуктор или тихоходный двигатель. Предназначены для перекачивания больших объёмов воды. Насосы проектируют и изготавливают из материала, подходящего для данного химического состава воды, с диаметром рабочего колеса 4 м, подача которого будет 108000 м³/ч и выше. Достоинством НБСК является то, что они не испытывают кавитации, даже если длина впускных трубопроводов составляет 300 м. Во многих случаях это позволяет устанавливать насосы в машинном зале, обеспечивая очень компактную компоновку станции. При неблагоприятном химическом составе воды специальным материалом покрываются только рабочее колесо, закладные детали и корпус. Спиральная камера таких насосов выполняется из железобетона. КПД таких насосов 65-70%.

По данным производителя НБСК, компании ALSTOM (Франция) железобетон не подвержен коррозии, даже при сложном химическом составе воды. Кроме того, при рассматриваемых скоростях потока, не возникнет проблем с истиранием песком. На всех АЭС EDF, работающих во Франции, используются НБСК конфигурации 2x50% производства ALSTOM.

Однако на российских АЭС применение насосов типа НБСК пока не возможно, т.к. железобетон, применяемый для изготовления спиральной камеры, не внесен в перечень материалов для изготовления оборудования и трубопроводов, определенный в НП-089-15 [58]. Эта конструктивная особенность насосов НБСК существенно влияет на надежность и безопасность насосного оборудования первого контура, что противоречит требованиям российских нормативных документов в области безопасности, надежности и качества оборудования для АЭС[59-61].

В целях выполнения программы инновационного развития Госкорпорации «Росатом» на период до 2020 года за основу принято строительство типовых блоков АЭС с ГЦН. Для дальнейшего продвижения российского проекта блока АЭС на мировом рынке постоянно ведутся работы по улучшению показателей качества оборудования применяемого в российском проекте блока АЭС [1,62,63].

Структурный анализ процесса конструкторское проектирование главных циркуляционных насосов

Вопросами концептуального и функционального проектирования блока АЭС занимается Проектный институт. При проектировании блока АЭС проектировщик блока определяет набор оборудования необходимой для обеспечения требуемой мощности блока. Как было отмечено выше, важным оборудованием блока является главный циркуляционный насос или насосное оборудование первого контура. Проектировщик блока задает требования к насосному оборудованию в виде технической спецификации (ТС). Проектировщик блока является внешним проектировщиком в процессе проектирования насосного оборудования.

Техническая спецификация поступает в конструкторскую организацию для дальнейшей проработки и выпуска технического проекта НО. Осуществляется процесс конструкторского проектирования или внутренне проектирование. Объектом конструкторского проектирования является пространственная структура оборудования, в виде реальных сборочных единиц и деталей, располагаемых вполне определенным образом. Результатом процесса конструкторского проектирования является комплект конструкторской документации технического проекта. Начальным этапом разработки технического проекта является разработка и выпуск технического задания (ТЗ).

На этом этапе определяют геометрические и основные эксплуатационные параметры продукции из условия ее работоспособности, определяются экономические и технические возможности реализации требований технической спецификации. Определяется компоновочное решение оборудования, проводятся технологические расчеты, устанавливаются специфические особенности назначения оборудования: закономерности движения рабочих органов, траектории их движений и скорости перемещений для выполнения заданных требований, требуемая производительность, режим работы и характерные условия эксплуатации. Параллельно с технологическими расчётами на рассматриваемом этапе также устанавливают необходимость в проектировании нового оборудования.

Следует иметь в виду, что создание нового оборудования требует значительных материальных затрат. Поэтому, прежде чем начать разработку нового оборудования, предварительно оценивают конструкции предыдущих проектов, которые могут выполнять запланированные функции, определенные в ТС. В качестве объективных факторов необходимости проектирования нового оборудования можно принять: отсутствие оборудования для осуществления планируемых функций, определенных в ТС; невозможность обеспечения существующим конструкциями оборудования требуемого качества, уровня механизации и автоматизации планируемого применения оборудования и других требований ТС. После решения вопроса выбора подходящей конструкции

оборудования из базы проектов или принятия решения о разработке новой конструкции оборудования, разрабатывается ТЗ. Стадия технического проектирования завершается согласованием и утверждением полного комплекта документации проекта.

ТЗ представляет собой документ, содержащий необходимые и достаточные требования для разработки оборудования, которые взаимно признаются заказчиком и разработчиком и закрепляются совместным договором. ТЗ содержит наименование и функциональную характеристику объекта проектирования, его технические, тактико-технические характеристики и показатели качества, технико-экономические требования, предъявляемые к разрабатываемой продукции, необходимые стадии разработок конструкторской документации и её состав, а также специальные требования заказчика к оборудованию.

С целью определения информационных потоков и операций, влияющих на качество процесса «конструкторское проектирование» насосного оборудования, был проведен системный анализ процесса. Установлены причинно-следственные связи требований изложенных в технической спецификации заказчика и показателей качества, характеризующих насосное оборудование, необходимых для синтеза ТЗ.

Анализ процесса проведен с применением методологии IDEF0, рассмотрена функциональная модель процесса конструкторского проектирования (далее – процесса проектирования насосного оборудования) [64]. Контекстная диаграмма верхнего уровня А-0 процесса проектирования насосного оборудования приведена на рисунке 4. Деятельностью узла А0 является проектирование насосного оборудования. На входе этого блока – ТС, на выходе – утвержденный технический проект. Управляющими воздействиями и ограничениями процесса являются требования нормативных документов. Механизмами для выполнения процесса являются конструктор проекта (конструкторская служба) и базы данных.

На рисунке 5 представлена функциональная диаграмма узла А0, отображающая деятельность по проектированию насосного оборудования.



Точка зрения: служба главного конструктора НО

Цель: улучшение процесса проектирования НО

Задачи:

- выявить основные связи, процессы и операции деятельности проектирования насосного оборудования;
- показать связь процесса с другими процессами системы менеджмента качества организации;
- определить операции (этапы) влияющие на качество процесса;
- определить действия для реинжиниринга процесса.

Узел: A-0

Проектировать насосное оборудование

Лист 1

Рисунок 4 - Контекстная диаграмма верхнего уровня A-0 процесса проектирования насосного оборудования

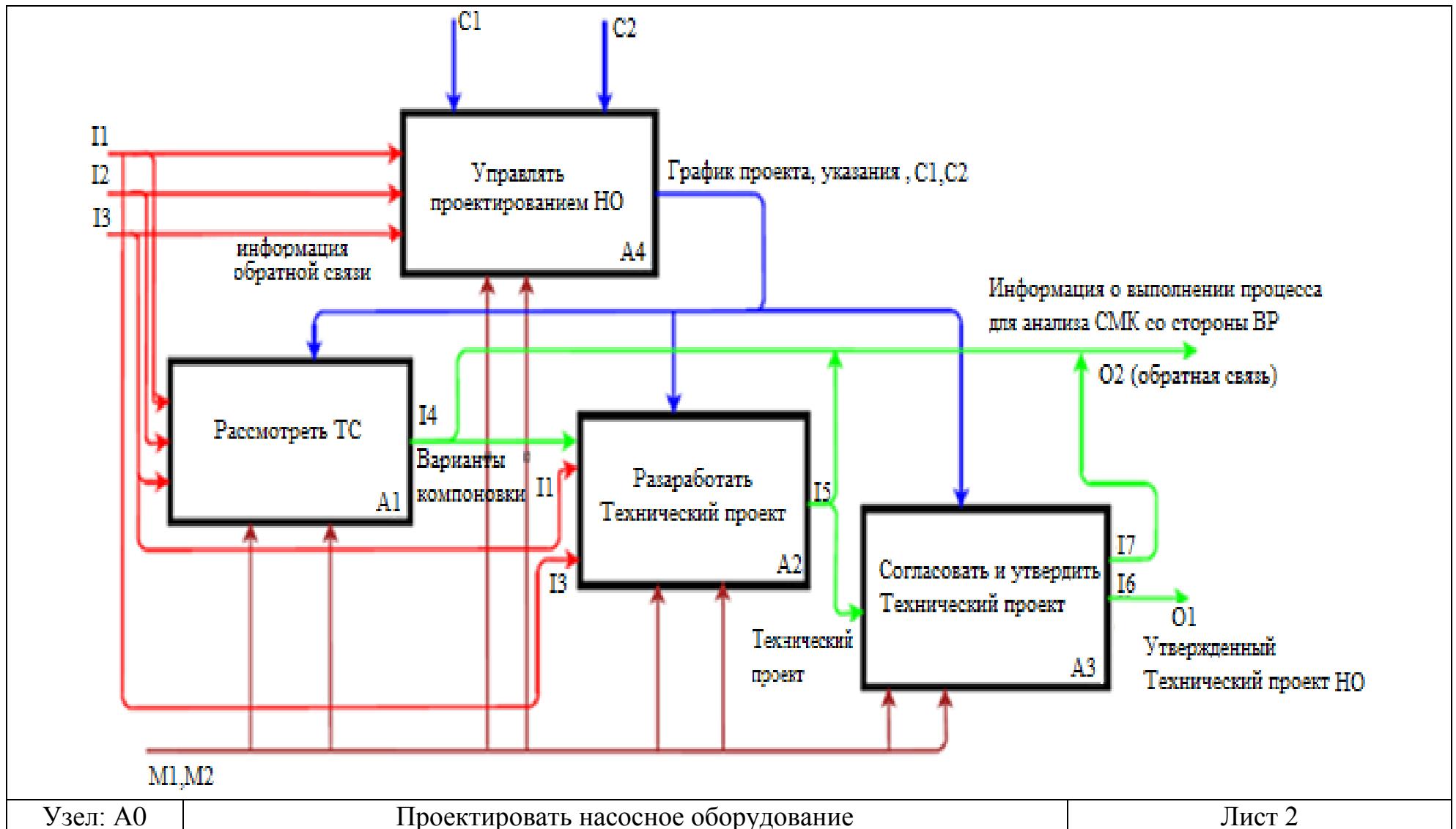


Рисунок 5 - Функциональная диаграмма узла А0 деятельности по проектированию насосного оборудования

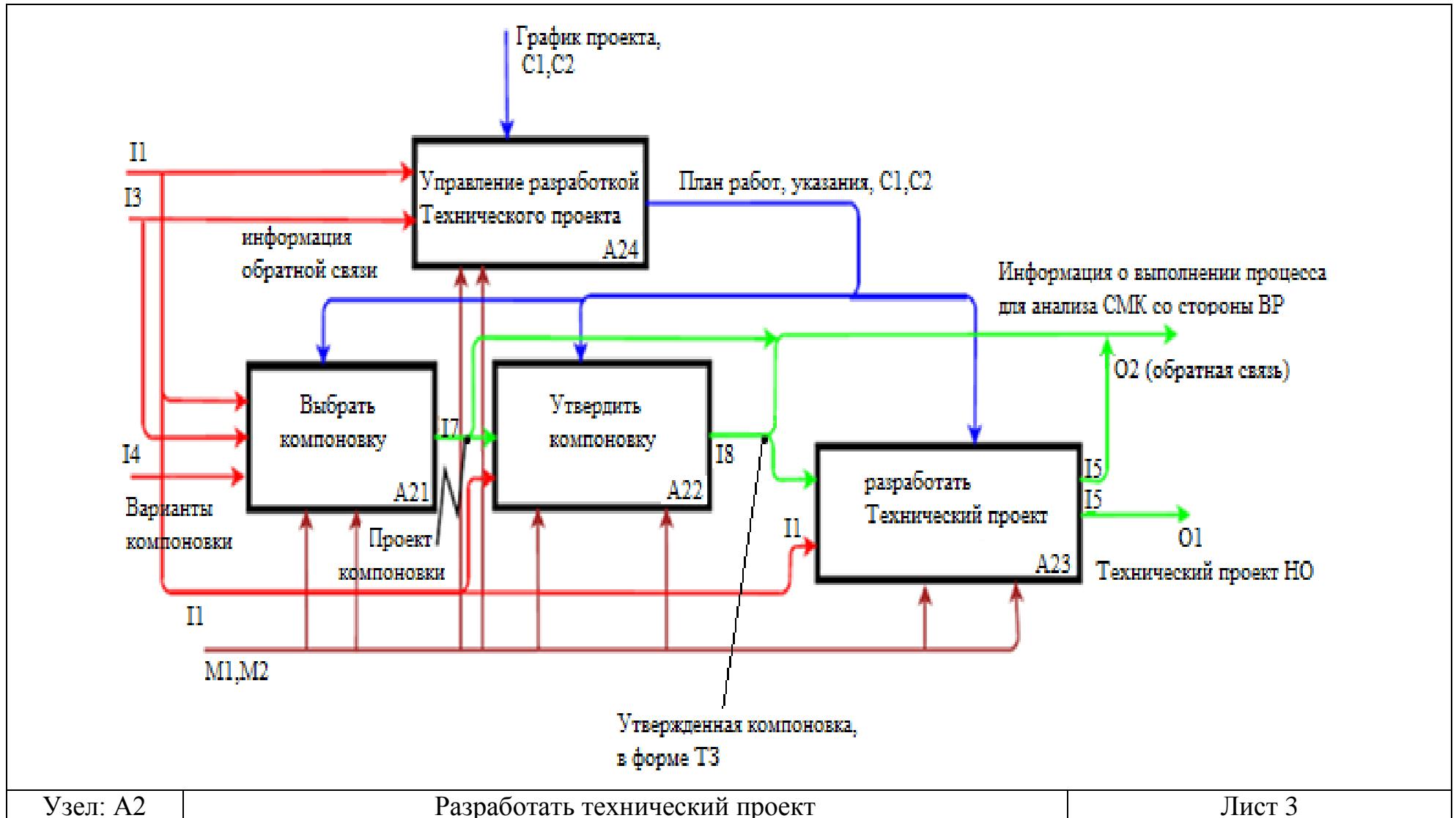


Рисунок 6 - Диаграмма декомпозиции второго уровня, узел А2 - процесс «разработка технического проекта», операции процесса

Узел А2 «Разработать технический проект» (рисунок 6) является декомпозицией второго уровня.

В результате системного анализа узла А2 выявлено, что важным этапом, влияющим на качество проекта насосного оборудования является этап выпуска ТЗ, улучшению подлежит операция «выбор компоновки», на этом этапе решается проблема выбора.

Руководитель конструкторской службы является «лицом принимающим решение» в вопросе выбора оптимального компоновочного решения для дальнейшей проработки требований ТС и выпуска ТЗ.

Как отмечено выше, одной из операций по формированию ТЗ, является выбор компоновочного решения проектируемого оборудования. Таким образом, можно сделать вывод о том, что оптимальный выбор компоновочного решения насосного оборудования сложным образом влияет на: надежность и безопасность, компактность, удобство обслуживания, стоимость, металлоемкость, выходные характеристики, конкурентоспособность проекта атомной станции в целом.

1.2 Международные требования управления качеством процесса проектирования и разработки насосного оборудования

Стандарт ГОСТ Р ИСО 9001-2015 [65] пропагандирует идею непрерывного совершенствования. В стандарте для создания эффективной системы менеджмента качества (СМК) применен процессный подход, который включает цикл «планирование – действие – проверка – корректировка» или «Plan–Do–Check–Act»(PDCA), и риск-ориентированное мышление.

Риск-ориентированное мышление позволяет организации определять факторы, которые могут привести к отклонению от запланированных результатов процессов и системы менеджмента качества организации, а также использовать предупреждающие средства управления для минимизации негативных последствий и максимального использования возникающих возможностей.

Стандарт содержит требования к основным процессам жизненного цикла продукции и услуг и в первую очередь к процессу «Проектирование и разработка продукции и услуг». Из рисунка 7 [66] следует, что чаще всего ошибки на этапах жизненного цикла продукции машиностроения возникают на этапах проектирования и подготовки производства.



Рисунок 7 - Закон распределения ошибок на этапах жизненного цикла продукции среднего машиностроения

В соответствии с «Правилом десяти» примерное соотношение между затратами на устранение ошибок на выделенных этапах выглядит следующим образом (рисунок 8) если обнаружение и устранение дефектов на этапе проектирования потребует затрат в размере, к примеру, Q рублей, то устранение этой ошибки на стадии подготовки обойдется $10Q$, на стадии производства – $10Q \times 100Q = 1000Q$, на стадии контроля – $10Q \times 100Q \times 1000Q = 1000000Q$, а у потребителя - уже составит $1000000000Q$.



Рисунок 8 - Соотношение расходов по устранению ошибок на разных этапах жизненного цикла продукции среднего машиностроения

Таким образом, в настоящее время организации, применяющие СМК по ГОСТ Р ИСО 9001-2015 создают необходимые инструменты (методики) по управлению рисками на различных этапах полного жизненного цикла (ПЖЦ) продукции среднего машиностроения.

ГОСТ Р ИСО 31000-2010 [67] может применяться на разных этапах жизненного цикла организации и для широкого спектра деятельности, включая стратегии и решения, операции, процессы, функции, проекты, продукцию, услуги и активы. Несмотря на то, что стандарт представляет обобщенное руководство, он не предназначен для обеспечения единообразия риск-менеджмента во всех организациях. При создании и применении планов,

касающихся инфраструктуры риск-менеджмента, необходимо учитывать различные потребности конкретной организации: ее частные цели, ситуацию, структуру, операции, процессы, функции, проекты, продукты, услуги и активы, а также конкретную практику, принятую в организации. Стандарт устанавливает общий подход для поддержки стандартов, распространяющихся на конкретные риски и/или отрасли, и не заменяет эти стандарты.

Общий подход к управлению рисками заключается в следующем:

- выявление риска, оценка вероятности его реализации масштаба последствий;
- выбор методов и инструментов управления выявленным риском;
- разработка риск-стратегии с целью снижения вероятности реализации риска и минимизации возможных негативных последствий;
- реализация риск-стратегии;
- оценка достигнутых результатов и корректировка риск-стратегии.

Нормативные документы МАГАТЭ по управлению качеством проекта реакторной установки GSR Part 2,а также многие национальные нормы, например, такие как YVL E.9 и ASME NC-3400 [68-70] определяют требования по управлению качеством проектирования РУ блока АЭС, включая оборудование применяемое в проекте РУ. В этих нормативных документах обязательным требованием является обеспечение верификации проекта и управление рисками проекта на всех этапах проектирования. Методы проведения верификации разработчик определяет самостоятельно, применяемые методы должны обеспечивать и гарантировать безопасность оборудования во всех смыслах. Верификация проекта может включать: осуществление альтернативных расчетов; сравнение технической документации по новому проекту с аналогичной документацией по апробированному проекту; проведение испытаний и демонстраций; анализ документов до их выпуска. Таким образом оценивание проекта оборудования в соответствии GSR Part 2 и ГОСТ Р ИСО 9001-2015 является необходимым действием и предполагает разработку методики для такой оценки.

Риски на этапе проектирования

Все риски на этапе проектирования имеют одинаково критически важное значение для реализации проекта и могут повлечь за собой нарушение сроков подготовки проектной и рабочей документации, а также рост стоимости проекта. Основные риски на этапе проектирования насосного оборудования:

- принятие неоптимальных решений на этапе подготовки документации технического проекта (стадия «Т»);
- получение недостаточно полной или неверной исходной информации, используемой при подготовке проектной документации;
- несоответствие отдельных частей проектной документации друг другу;
- изменение конфигурации АЭС после завершения этапа проектирования;
- нарушение сроков согласования проектной документации субпоставщиками, поставщиком и владельцем;
- критически важные изменения в требованиях законодательства к подготовке проектной документации, возникшие после завершения этапа проектирования.

В данной работе рассматривается методика оценки рисков принятия неоптимальных решений на этапе подготовки документации технического проекта. При обзоре международных нормативных документов по управлению качеством разработки и проектирования [68-70] установлена необходимость проведения верификации проекта и управления рисками при проектировании насосного оборудования. В нормативных документах [68] отмечено, что организация, занимающаяся вопросами проектирования РУ и оборудования для объектов использования атомной энергии, должна самостоятельно разрабатывать такие методики. Исходя из выше сказанного, подтверждается необходимость научной разработки в направлении оценки выбора компоновочного решения насосного оборудования с учетом рисков при проектировании [71-73].

1.3 Исследования в области выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования

Проблема выбора конструкции оборудования на начальном этапе конструкторского проектирования это проблема принятия решения. Проблема принятия решения рассматривается в трудах ИСА РАН, СПИИРАН и работах отечественных и зарубежных ученых и исследователей: Ю.С. Попкова, Р.М. Юсупова, Б.В. Соколов, Г. Саймона, Р. Акоффа, С. Янга, Х. Райфа, Э.Мушкиа, П.Мюллера, О.И. Ларичева, Е.П. Голубкова, А.Г. Венделина, Ю.Ю. Екатеринославского, Ю.Ф. Мартемьянова, Т.Я. Лазаревой, С.Я. Егорова, А.В. Белова и других ученых [74-82].

В работе Егорова С.Я. [78] подробно рассмотрены вопросы определения рационального компоновочного решения производства, а именно: определение размеров и конфигурации цеха; оптимального расположения в цеху оборудования технологических линий; трассировки трубопроводов и трубопроводной арматуры.

Исходными данными для определения рационального компоновочного решения цеха являются: геометрия цеха, для размещения оборудования (предельно допустимые размеры цеха; количество этажей; высота этажей; тип перекрытия и т.п.); данные о размерах всего применяемого оборудования; информация о структуре технологических связей; процедурная модель выбора аппаратуры, рассмотренная на примере выбора трубопроводной арматуры.

Автором предложен автоматизированный метод выбора арматуры по одинаковым основным потребительским параметрам. Методика выбора состоит из двух этапов. На первом этапе формируется подмножество типов арматуры, выпускаемой промышленностью (база данных). На втором этапе выбора апаратуры среди множества типов выбирается такой тип арматуры, который удовлетворяет потребительским требованиям. Выбор арматуры, соответствующей требованием потребителя, производится методом экспертных

оценок. Решается многокритериальная задача с применением методов нормализации множества критериев, а также метода многокритериального выбора. В работе Егорова С.Я. критерий оптимальности определен как сумма взвешенных относительных потерь критериев: стоимости аппаратуры и некоторого подмножества требований задаваемого лицом, принимающим решение.

При рассмотрении методики, предложенной Егоровым С.Я., выявлены следующие недостатки, не позволяющие применить её к процессу выбора компоновочного решения насосного оборудования для АЭС:

- в методике не проводится определение согласованности мнений экспертов, что может привести при наличии ограниченного круга экспертов к значительным погрешностям, следовательно, для решения задач связанных с разработкой НО для АЭС данный метод носит ограниченный характер применимости;
- представленная методика не сравнивает различные схемы компоновочных решений, особенно при разработке новых компоновок;
- в методике Егоров С.Я. не применяется риск-менеджмент на этапе проектирования.

В работе А.В. Белова [81] процесс выбора компоновочного решения предлагается решать с применением теории информации. При конструкторском проектировании важным вопросом является проблема обеспечения заданных в технической спецификации (ТС) показателей качества, с учетом ограничений на ресурсы. Выбор характеристик будущей конструкции это задача, которую можно классифицировать не только как относящуюся к теории надежности и технологии машиностроения, но и к теории информации. При рассмотрении задачи конструкторского проектирования с точки зрения теории информации применяют динамическую теорию информации, теорию оптимального управления и моделирования. Применение динамической теории информации и информационной теории управления возможно в связи с эволюционностью процесса конструкторского проектирования. Информационный процесс

проектирования технической системы представляется в виде сложной системы с переменной структурой и описывается: целью функционирования системы; воздействиями управления; показатели ценности; информацией управления и входной информацией; операторами преобразования входной информации, операторами преобразования производимых затрат; информационным коэффициентом адекватности. Полное достижение цели состоит в выполнении условий в выражении (1):

$$PK_{ij} \in [PK_{ij}] \gamma_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, s}; E_v(PK_{ij}) \xrightarrow[i=\overline{i,n}, j=\overline{j,s}, v=\overline{1,m}]{} 0, \quad (1)$$

где $E_v(PK_{ij})$ - ущерб для всех различных состояний конструкторского проектирования продукции. Параметрами PK_{ij} являются показатели качества (ПК) создаваемой продукции, включённые в ТС; n - число показателей качества, s - число этапов разработки продукции, m - число различных вариантов проекта разрабатываемой продукции по i -му показателю качества на j -м этапе разработки; γ - доверительная вероятность нахождения значений ПК в заданных пределах.

В процессе выполнения очередного этапа конструкторского проектирования, так и по завершении проекта в целом, успех считается достигнутым, если подтверждается соответствие результатов конструирования требованиям ТС по всем показателям качества. Нахождение наилучших решений с точки зрения выполнения требований ТС к техническим характеристикам, особенно к требованиям надёжности, связано с тем, насколько оптимальны используемые информационные средства на каждом из этапов конструкторского проектирования. Недостатками применения методики А.В. Белова при конструкторском проектировании насосного оборудования для АЭС является сложность автоматизации расчетов по методике, работа не учитывает управление рисками при проектировании.

Проблема выбора компоновочного решения главного циркуляционного насоса в отрасли атомная энергетика исследована мало, можно отметить работу

Э.Г. Новинского «Исследования по созданию главных циркуляционных насосов для АЭС и ЯЭУ» [82]. В этой работе рассматриваются конструкторские решения на этапе отработки уже выбранной компоновки НО для циркуляции натриевого теплоносителя. В работе Э.Г. Новинского дается прогноз применения выработанных конструкторских решений новых НО для циркуляции водяного теплоносителя, вопрос выбора компоновочного решения НО не рассматривается с точки зрения выполнения новых требований МАГАТЭ, ИСО и других международных документов [67-70]: верификация проекта и управление рисками при проектировании и разработке.

До внедрения результатов предлагаемого диссертационного исследования в АО «Центральное конструкторское бюро машиностроения» (АО «ЦКБМ») применялся традиционный подход выбора компоновки насосного оборудования, он заключается в применении метода «попарного сравнения». Очевидно, что эффективность и достоверность результата такого метода снижается при увеличении числа сравниваемых вариантов компоновок НО, такой метод сравнения не учитывает риски. Так же на начальном этапе стадии технического проектирования, особенно при конструировании нового оборудования, может быть недостаточно статистических данных для принятия оптимального решения по выбору компоновочного решения.

Анализ работ [74-82] позволяет сделать вывод, что предложенные методики необходимо адаптировать к процессу конструкторского проектирования насосного оборудования для атомных станций с учетом новых требований международных стандартов. Специфика задачи выбора оптимального компоновочного решения на начальном этапе стадии технического проектирования заключается в нахождении решения задачи многокритериальной нелинейной оптимизации с оценкой рисков. В настоящее время не существует типовых методик решения задач многокритериальной нелинейной оптимизации.

В данной работе предлагается методика решения такой задачи для осуществления оптимального выбора компоновочного решения насосного оборудования.

1.4 Выводы к главе 1

В результате анализа процесса конструкторское проектирование насосного оборудования для атомных электростанций подтверждена важность проведения верификации проекта и оценки рисков, связанных с процессом проектирования и разработки. На основе проведенного анализа работ отечественных и зарубежных ученых и нормативных документов, определяющих требования к процессу «проектирование и разработка» сделаны следующие выводы:

- установлена необходимость проведения оценки оптимальности выбора компоновочного решения для дальнейшей проработки технического задания;
- установлено, что конструкторская организация должна разработать методику верификации проекта и оценки рисков при проектировании в соответствии с требованиями новых международных стандартов по управлению деятельностью;
- выявлено отсутствие методики верификации на начальном этапе технического проектирования с учетом требований новых международных нормативных документов по управлению качеством при проектировании.

Для решения поставленной задачи исследования автор предлагает разработать методику выбора оптимального компоновочного решения на начальном этапе технического проектирования насосного оборудования с оценкой рисков и реализовать методику в программном обеспечении.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО КОМПОНОВОЧНОГО РЕШЕНИЯ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

2.1 Анализ объекта исследований

Насосное оборудование

Современное насосное оборудование, применяемое на АЭС, представляет собой насосные агрегаты. Насосный агрегат - это устройство, состоящее из насоса, приводного двигателя, соединительной муфты (или вариатора частоты вращения) и контрольно-измерительных приборов.

Главный циркуляционный насосный агрегат для атомной станции относится к классу центробежных насосов.

Центробежный насос (ЦБН) – лопастная гидравлическая машина, предназначенная для преобразования механической энергии вращающегося ротора в механическую энергию движущейся жидкости с поворотом ее в зоне рабочего колеса из осевого направления в радиальное направление.

Конструктивное исполнение ЦБН чрезвычайно разнообразно. Для их изготовления применяют самые различные материалы (металлы, пластмассы, керамику, резину, стекло и др.).

Большое разнообразие конструкций ЦБН объясняется тем, что параметры насосов этого типа изменяются в широком диапазоне (по подачам от 1 до 150000 м³/ч; по давлениям нагнетания до 50 МПа; по температурам перекачиваемой жидкости до 400°C и более), а так же тем, что эти насосы применяют для перекачивания самых разнообразных жидкостей или гидросмесей. Кроме того на конструкцию ЦБН значительное влияние оказывают специфические условия отраслевой техники, для которой они применяются. Габаритные и массовые характеристики ЦБН в зависимости от их параметров и конструктивного

исполнения изменяются также в широких пределах. Освоенные промышленностью насосы имеют массы от 2 кг и менее до 20000 кг и более.

Классификация ЦБН по конструктивному исполнению регламентирована ГОСТ 17398 [83]. Согласно ГОСТ 4.118-84 «Оборудование насосное. Номенклатура основных показателей» [84], номенклатура основных показателей качества насосного оборудования приведена в таблице 2.

Таблица 2 - Показатели качества насосного оборудования

<i>Наименование показателя качества и единицы измерения</i>	<i>Обозначение показателя качества</i>
<i>Показатели назначения (классификационные)</i>	
Подача, м ³ /с (м ³ /ч, м ³ /сут., л/ч)	<i>Q</i>
Напор, м	<i>H</i>
Давление, Па (МПа)	<i>P</i>
Частота вращения, с ⁻¹ (об/мин)	<i>n</i>
Число двойных ходов, с ⁻¹	<i>n₂</i>
<i>Показатели технической и энергетической эффективности</i>	
Коэффициент полезного действия, %	<i>η</i>
Коэффициент подачи, %	<i>η₀</i>
Допускаемый кавитационный запас, м [*]	<i>Δh_{зап}</i>
Допускаемая вакуумметрическая высота всасывания, м [*]	<i>H_{зап}</i>
Подпор, м [*]	<i>h</i>
<i>Показатели конструктивные и технологические</i>	
Масса, кг ^{**}	<i>m</i>
Удельная материалоемкость, кг/МДж (кг/ГДж) ^{**}	<i>K_{ум}</i>
<i>Показатели надежности</i>	
Установленный ресурс (до капитального ремонта или до списания), ч ^{***}	<i>T_{py}</i>
Назначенный ресурс (до капитального ремонта или до списания), ч ^{***}	<i>T_{ph}</i>

* В зависимости от вида системы, в которой используют насосное оборудование, указывают допускаемый кавитационный запас или допускаемую вакуумметрическую высоту всасывания или подпор.

** По усмотрению разработчика указывают массу или удельную массу.

*** По согласованию с заказчиком вместо установленного ресурса указывают назначенный ресурс.

Группа «Показатели назначения»

Подача объемная Q [$\text{м}^3/\text{с}$] – отношение объема подаваемой жидкостью среды ко времени [83,85]

Напор H [м] – приращение полной удельной энергии жидкости в насосе[83, 85]. Измеряется напор в метрах столба перекачиваемой жидкости.

Давление P [Па] - наряду с подачей насоса другая ключевая характеристика насоса. Показывает высоту, на которую агрегат способен поднять столб перекачиваемой жидкости. Это зависит от того, какую энергию каждая частичка жидкости приобретает, соприкасаясь с рабочим органом насоса. Диапазон этой характеристики колеблется от 2-3 метров для небольших насосов и до 1800 метров (примерно 180 атмосфер) для промышленных насосов [83, 85].

Частота вращения n [об/мин] - число оборотов рабочего колеса в единицу времени [83,85].

Группа «Показатели технической и энергетической эффективности»

Коэффициент полезного действия η [%] – выраженное в процентах отношение полезной мощности к потребляемой [83,85].

Допустимый кавитационный запас $\Delta h_{\text{доп}}$ [м] - минимальный напор, при котором не проявляется явление кавитации и обеспечивается работа насоса без изменения основных технических показателей [83, 85].

Группа «Показатели конструктивные и технологические»

Масса m [кг, т] – масса насоса, также дополнительно указывают массу электродвигателя [85].

Группа «Показатели надежности»

Назначенный ресурс T_{ph} [ч] – суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация объекта может быть продолжена только после принятия решения о возможности продления данного показателя [86].

При конструировании насосного оборудования учитывается еще один важный показатель - коэффициент быстроходности. Именно этот показатель качества определяет классификацию и конструкцию насосов [85].

Для характеристики формы проточной части насоса в соответствии с заданными параметрами, а также для сравнения между собой насосов различных типов используют понятие коэффициента быстроходности, который численно равен частоте вращения, об/мин, рабочего колеса (РК) насоса данной масштабной серии, развивающего напор $H = 1$ м при подаче $Q = 0.075 \text{ м}^3/\text{с}$, выражение (2)

$$n_s = \frac{3,65n\sqrt{Q}}{H^{3/4}}. \quad (2)$$

Выражение (2) показывает, что при неизменных параметрах Q и H с ростом n_s увеличивается частота вращения n , соответственно уменьшаются размеры и масса насоса. Следовательно, увеличение n_s экономически выгодно.

При неизменной частоте вращения n коэффициент быстроходности n_s увеличивается с ростом Q и уменьшением H . В этой связи тихоходные насосы применяют для создания больших напоров при сравнительно низких подачах, а быстроходные - наоборот. Соответственно изменяется и форма проточной части.

Для многоступенчатого насоса n_s определяется по параметрам ступени, для многопоточного - по параметрам потока.

Коэффициент быстроходности n_s определяет тип насоса и форму его рабочего колеса (радиальное, диагональное, осевое) или типоразмер насоса. Так, $n_s = 10\dots40[1/\text{мин}]$ соответствует объемным насосам, $n_s = 50\dots80[1/\text{мин}]$ – тихоходным центробежным насосам; $n_s = 80\dots150$ ЦБН средней быстроходности; $n_s = 150\dots350[1/\text{мин}]$ – быстроходным ЦБН; $n_s = 250\dots600[1/\text{мин}]$ – диагональным насосам; $n_s = 400\dots1100[1/\text{мин}]$ – осевым насосам; $n_s = 1000\dots5000[1/\text{мин}]$ – осевым насосам повышенной быстроходности.

При необходимости использовать какой-либо тип насоса, коэффициент быстроходности которого выходит за указанные пределы, применяют многоступенчатые насосы либо многопоточные. Для лопастных насосов с изменением n_s меняется форма проточной части рабочего колеса.

От величины критерия n_s зависит также форма напорной характеристики насоса и значение максимально достижимого КПД, рисунок 9.

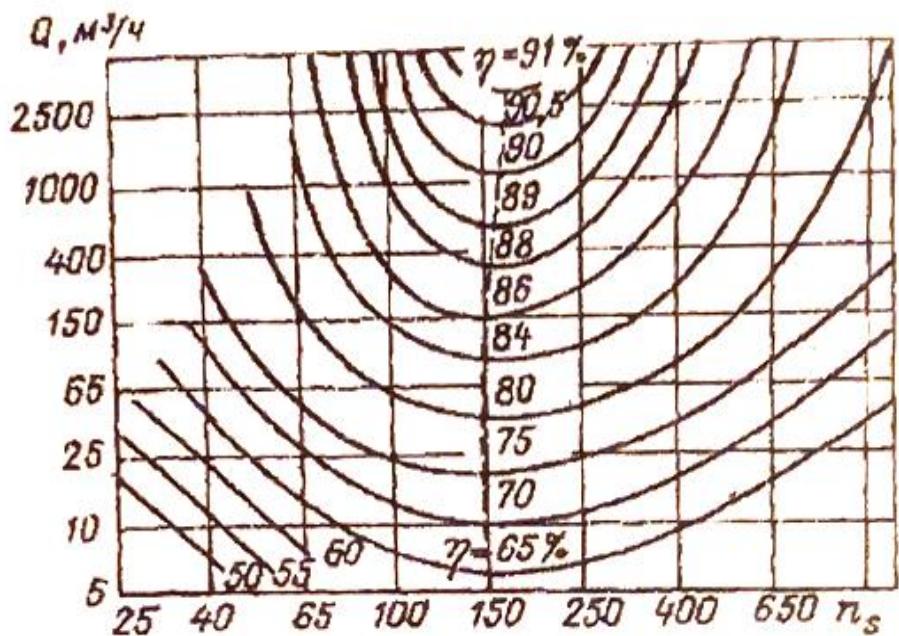


Рисунок 9 - Влияние n_s на экономичность насоса

На рисунке 10 дан примерный график областей использования различных типов насосов в зависимости от их подачи и напора.

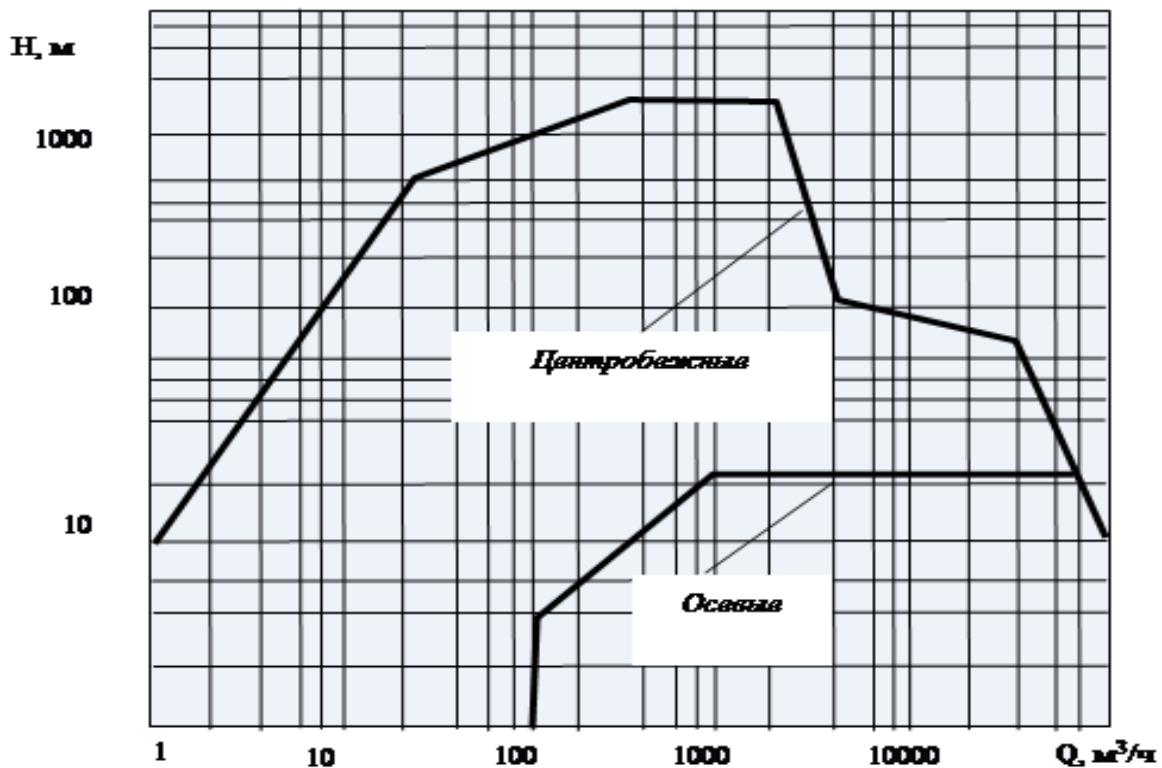


Рисунок 10 - Рекомендуемые области использования насосов

Таким образом, можно сделать вывод, что стандартизированную группу «показатели назначения», характеризующую насосное оборудование (таблица 2), необходимо дополнить критерием коэффициент быстроходности n_s .

Насосное оборудование для атомных станций

Главные циркуляционные насосы для АЭС конструктивно выполняют двух типов: герметичные (рисунок 11), у которых валы насоса и двигателя не имеют связанных с атмосферой концевых участков (протечки из насоса отсутствуют), и насосы с механическим уплотнением (рисунок 12), у которых вал насоса выходит из корпуса и соединяется с приводным двигателем обычного типа (протечки из насоса ограничиваются и контролируются).

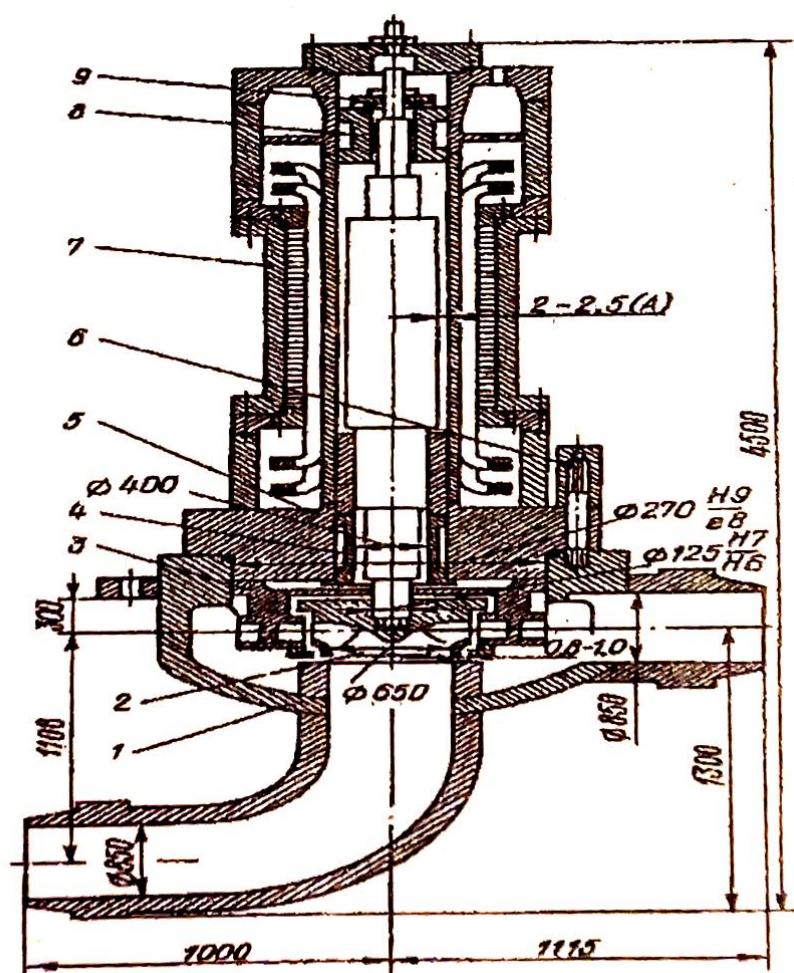


Рисунок 11 - Насос бессальниковый герметичный ГZN-310:

- 1 – корпус;
- 2 – колесо;
- 3 – отвод;
- 4 – нижний подшипник;
- 5 – крышка напорная;
- 6 – шпилька;
- 7 – электродвигатель;
- 8 – верхний подшипник;
- 9 – упорный подшипник.

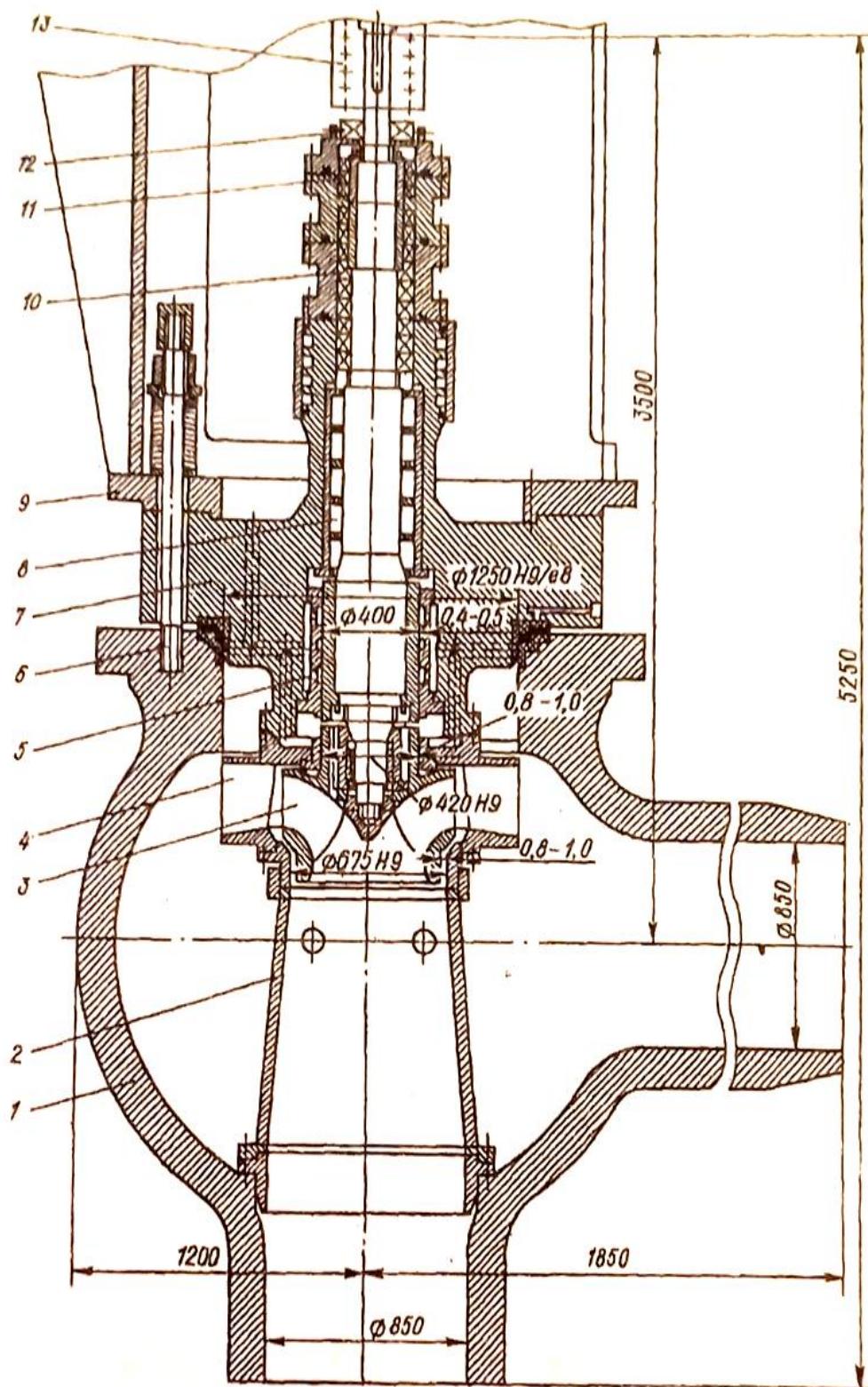


Рисунок 12 - Насос главный циркуляционный ГЦН 2000-100:

1 – корпус; 2 – конфузор; 3 – колесо; 4 – отвод; 5 – опорный подшипник; 6 – шпилька;
7 – крышка; 8 – теплообменник; 9 – фонарь электродвигателя; 10 – концевое уплотнение;
11 – торцевое уплотнения; 12 – упорный подшипник; 13 – муфта

Конструкция насоса должна обеспечивать возможность перемещения насоса вследствие температурных расширений трубопроводов (температура рабочей жидкости достигает 300°С и более).

К насосам этого типа предъявляются повышенные требования по надежности и ресурсу. Материалы, из которых изготавливаются детали проточной части насоса, помимо коррозионной и кавитационной стойкости и устойчивости против эрозии, не должны взаимодействовать с рабочей средой (теплоносителем).

Одним из главных требований, предъявляемым к негерметичным насосам, является обеспечение надежности работы узла уплотнения вала насоса.

В российских проектах насосного оборудования применяется электродвигатель, обеспечивающий частоту вращения (синхронную) 1000 об/мин.

Согласно ГОСТ 24656-81 «Насосы циркуляционные первого контура энергоблоков атомных электростанций с реакторами ВВЭР. Типы, основные параметры и общие технические требования» [87] насосы циркуляционные первого контура энергоблоков атомных электростанций станций с реакторами ВВЭР, это вертикальные ГЦН с механическим уплотнением вала.

ГОСТ 24656-81 устанавливает типы, основные параметры насосов и общие технические требования главных циркуляционных насосов для атомных станций с реакторами типа ВВЭР мощностью от 400 до 2000 МВт.

В п.1.1 ГОСТ 24656-81 приведена таблица типов и основных параметров главных циркуляционных насосов.

В связи с необходимостью дополнить номенклатуру показателей качества насосного оборудования критерием коэффициент быстроходности n_s , автор предлагает дополнить таблицу, приведенную в п.1.1. ГОСТ 24656-81, тогда таблица примет вид таблицы 3.

Таблица 3 - Типы и основные параметры ГЦН с учетом коэффициента быстроходности (авторская таблица)

<i>Обозначение типа</i>		<i>Подача насоса, м³/с (м³/ч)</i>	<i>Напор насоса, м (кгс/см²)</i>	<i>Коэффициент быстроходности n_s (1/мин) при n=1000об/минуту</i>	<i>Давление на входе в насос, МПа (кгс/см²)</i>	<i>Расчетное давление насоса, МПа (кгс/см²)</i>	<i>Температура теплоносителя на входе в насос, К (°C)</i>	<i>Расчетная температура стенок, К (°C)</i>
Центрбежные быстроходные	ГЦН 1,975-51,4	1,975 (7100)	51,4 (4,000)	260	12,22 (125)	13,71 (140)	543 (270)	608 (335)
	ГЦН 5,5-93,0	5,5 (20000)	93,0 (6,750)	280	15,30 (156)	17,62 (180)	573 (300)	623 (350)
	ГЦН 6,95-73,7	6,95 (25000)	73,1-100,5 (5,500-7,500)	300-350	15,30 (156)	17,62 (180)	563 (290)	623 (350)
Центрбежные диагональные	ГЦН	9,72-12,5 (35000-45000)	100,5-114 (7,500-8,500)	350-370	15,30 (156)	17,62 (180)	563 (290)	623 (350)

Номенклатура показателей качества насосного оборудования на начальном этапе технического проектирования

РД 50 64-84 [88] содержит таблицу «Применяемости показателей качества» по группам продукции, таблица 4.

Таблица 4 - Применяемость групп показателей качества продукции

<i>Наименование группы показателей качества продукции</i>	<i>Группа продукции</i>				
	<i>природное сырье и топливо</i>	<i>материалы и продукты</i>	<i>расходные изделия</i>	<i>неремонтируемые изделия</i>	<i>ремонтируемые изделия</i>
1. Показатели назначения	+	+	+	+	+
2. Показатели надежности: безотказности; долговечности; ремонтопригодности; сохраняемости	- - - +	- - + +	- - + +	+	+
3. Показатели экономного использования сырья, материалов, топлива, энергии и трудовых ресурсов	+	+	+	+	+
4. Эргономические показатели	-	+	+	+	+
5. Эстетические показатели	-	+	+	+	+
6. Показатели технологичности	+	+	+	+	+
7. Показатели транспортабельности	+	+	+	+	+
8. Показатели стандартизации и унификации	-	-	+	+	+
9. Патентно-правовые показатели	-	+	+	+	+
10. Экологические показатели	-	+	+	+	+
11. Показатели безопасности	+	+	+	+	+
<p>Примечание: 1. В таблице знак «+» означает применяемость; «-» не применяемость соответствующих показателей качества продукции. 2. Вместо показателей ремонтопригодности для материалов, продуктов и расходных изделий применяют показатели восстанавливаемости. 3. В обоснованных случаях по согласованию с заказчиком (основным потребителем) допускается отклонение от таблицы</p>					

Из анализа этой таблицы следует, что для группы продукции «ремонтируемые изделия», к которым относится насосное оборудование, применяется 11 групп показателей качества [89, 90]:

1. Показатели назначения;
2. Показатели надежности, включая показатели безотказности, долговечности, ремонтопригодности, сохраняемости;
3. Показатели экономного использования сырья, материалов, топлива, энергии и трудовых ресурсов;
4. Эргономические показатели;
5. Эстетически показатели;
6. Показатели технологичности;
7. Показатели транспортабельности;
8. Показатели стандартизации и унификации;
9. Патентно-правовые показатели;
10. Экологические показатели;
11. Показатели безопасности.

Перечисленная выше номенклатура групп показателей применяется для оценки качества готовой продукции. На начальном этапе технического проектирования, многие данные еще не известны и, зачастую, при проектировании новых конструкций таких данных может не быть. Тогда с учетом таблицы 5, взятой из ГОСТ 4.118-84 [84] автором определен перечень показателей качества для оценки проекта НО на начальном этапе технического проектирования.

Набор показателей качества применяемых для оценки проекта НО при утверждении компоновочного решения приведен в таблице 6, применяются следующие группы показателей качества: показатели назначения; показатели технической и энергетической эффективности; конструктивные и технологические показатели; показатели надежности; требования к безопасности и охране окружающей среды; эстетические и эргономические показатели; требования к транспортированию и хранению [91].

Таблица 5 - Применимость основных показателей качества при разработке документации на насосное оборудование

<i>Наименование показателей качества</i>	<i>Применимость в НД</i>			
	<i>стандарты</i>	<i>T3</i>	<i>ТУ</i>	<i>КУ</i>
Подача	+	+	+	+
Напор или давление	+	+	+	+
Частота вращения или число двойных ходов	+	+	+	+
Коэффициент полезного действия или коэффициент подачи	+	+	+	+
Допускаемый кавитационный запас или допускаемая высота всасывания или подпор	+	+	+	+
Масса или удельная масса	±	+	+	+
Установленная безотказная наработка	±	+	+	-
Установленный ресурс (до капитального ремонта или до списания) или назначенный ресурс (до капитального ремонта или до списания)	±	+	+	+
Примечание: Знак «+» означает применимость; «-» не применимость соответствующих показателей качества продукции; знак «±» - ограниченную применимость показателей качества				

Таблица 6 - Номенклатура показателей качества на начальном этапе технического проектирования насосного оборудования (авторская таблица).

<i>Наименование группы показателей качества продукции</i>	<i>Единичные и комплексные показатели качества, параметры сравнения</i>
1. Показатели назначения	1.1. Подача 1.2 Напор 1.3 Частота вращения 1.4 Коэффициент быстроходности
2. Показатели технологической и энергетической эффективности	2.1 КПД 2.2 Кавитационный запас
3. Конструктивные и технологические показатели	3.1 Весовое совершенство 3.2 Соответствие геометрии машинного зала (компоновка боксов и расположение вспомогательных систем)
4. Показатели надежности	4.1 Коэффициент готовности 4.2 Ремонтопригодность 4.3. Сохранность в упаковке 4.4 Средний ресурс между средними ремонтами 4.5 Средняя наработка на отказ 4.6 Назначенный срок службы
5. Требования к безопасности и охране окружающей среды	5.1 Механическая безопасность 5.2 Электрическая безопасность 5.3. Термическая безопасность 5.4 Внешняя утечка
6. Эстетические и эргономические показатели	6.1 Вибрация 6.2 Шум 6.3. Внешняя доступность для ремонта электродвигателя 6.4. Расположение регулировочных и соединительных элементов 6.5. Потребность в высококвалифицированном обслуживающем персонале (шефмонтаж, авторский надзор)
7. Требования к транспортированию и хранению	7.1 Расположение элементов раскрепления 7.2 Сохранность без упаковки

2.2 Математическая постановка задачи исследования и ее решение

Многокритериальные задачи принятия решений

Большое число и разнообразие требований к формированию конструкции НО для АЭС позволяет характеризовать задачу выбора оптимальной компоновки НО как многокритериальную. Поэтому с учетом многопараметричности и нелинейности функции достижения цели решения данной задачи, решение такой задачи с учетом известных методов, являются крайне затруднительным. Например, традиционный подход выбора компоновки НО заключается в применении метода «попарного сравнения» и метода анализа иерархий (МАИ) [92-94]. Метод анализа иерархий (МАИ), предложенный американским математиком Т.Л. Саати, основан на парных сравнениях альтернативных вариантов по различным критериям с использованием девятибалльной шкалы и последующим ранжированием набора альтернатив по всем рассматриваемым в задаче критериям и целям. Взаимосвязь между критериями учитывается путём построения иерархий критериев и применением парных сравнений для выявления важности критериев и подкритериев.

К основным процедурам метода анализа иерархий относятся следующие:

- генерация множества альтернативных вариантов;
- формирование множества критериев для оценки альтернативных вариантов и представление его в виде иерархии;
- выявление предпочтений экспертов на множестве альтернатив по различным критериям;
- установление относительной важности влияния критериев на общую цель и другие критерии;
- получение ранжированных наборов альтернатив по всем критериям и целям.

Все оценки определяются экспертами. Сначала эксперты генерируют множество допустимых альтернатив, среди которых необходимо провести выбор лучшей альтернативы или упорядочивание всех элементов. Вершиной иерархий

обычно является глобальная цель, на следующих уровнях присутствуют критерии и на самом нижнем уровне - альтернативы. Иерархическая структура критериев и целей является моделью знаний конкретной предметной области, которая изменяется и уточняется с течением времени. Элементы одного уровня иерархии попарно сравниваются по силе их влияния на элементы более высокого уровня. Результаты заносятся в матрицу попарных сравнений. При сравнении элемента с самим собой имеем равную значительность «1», т.е. главная диагональ матрицы состоит из единиц. В МАИ используется девятибалльная шкала:

<i>Интенсивности относительной важности</i>	<i>Определение</i>	<i>Объяснение</i>
1	Равная важность	Равный вклад двух объектов в достижении цели
3	Умеренное превосходство одного над другим	Опыт и суждения дают легкое превосходство одному объекту над другим
5	Существенное или сильное превосходство	Опыт и суждения дают сильное превосходство одному объекту над другим
7	Значительное превосходство	Одному объектудается настолько сильное превосходство над другим, что оно становится значимым
9	Очень сильное превосходство	Очевидность превосходства одного объекта над другим подтверждается наиболее сильно
2,4,6,8	Промежуточные значения между двумя соседними суждениями	Принимаются в компромиссных случаях
Обратные величины приведенных чисел	Если при сравнении одного объекта с другим получено одно из вышеуказанных чисел (например 3), то при сравнении второго объекта с первым получим обратную величину (т.е. 1/3)	

Следующий шаг состоит в вычислении вектора приоритетов по данной матрице. Существует несколько методов оценки этого вектора. Например, суммировать элементы каждой строки матрицы и нормировать делением каждой суммы на сумму всех элементов матрицы. Первый элемент результирующего вектора будет приоритетом первого объекта, второй - второго объекта и т.д.

В общем случае (при наличии более трех уровней) иерархия оценивается следующим образом:

1. Производится попарное сравнение элементов второго уровня по степени влияния на выполнение цели. Результаты заносятся в матрицу попарных сравнений A_1 ;
2. Производится попарное сравнение элементов 3-го уровня по степени влияния на каждый критерий второго уровня. Результаты заносятся в n_1 (n_1 - количество критериев) матриц попарных сравнений $A_{11}...A_{n1}$;
3. Действия п.2 повторяются для всех оставшихся уровней (если они есть);
4. Для каждой матрицы вычисляется вектор приоритетов;
5. Каждый элемент вектора приоритетов второго уровня умножается на соответствующий элемент вектора приоритетов каждой из матриц ($A_{11}...A_{n1}$). После сложения всех произведений получается вектор приоритетов третьего уровня;
6. Действия п.5 выполняются для всех оставшихся уровней.

В результате получается вектор приоритетов n -го уровня по степени влияния на выполнение цели.

В рамках МАИ нет общих правил для формирования структуры модели принятия решения. Это является отражением реальной ситуации, поскольку всегда для одной и той же проблемы имеется целый спектр мнений. Метод позволяет учесть это обстоятельство с помощью построения дополнительной модели для согласования различных мнений, посредством определения их приоритетов. При подготовке принятия решения метод позволяет учитывать «человеческий фактор». Это одно из важных достоинств данного метода перед другими методами принятия решений.

Создание структуры модели принятия решения в методе анализа иерархий представляет собой достаточно трудоемкий процесс. Однако в итоге удается получить детальное представление о том, как именно взаимодействуют факторы, влияющие на приоритеты альтернативных решений, и сами решения. Как именно формируются рейтинги возможных решений и рейтинги, отражающие важность факторов.

Метод анализа иерархий не имеет инструментов проверки достоверности данных, что, несомненно, является недостатком метода и отчасти ограничивает возможности его применения. В связи с чем, главным образом метод применяется в тех случаях, когда в принципе не может быть объективных данных, и основными мотивами для принятия решения являются предпочтения лица принимающего решение.

Работа по подготовке принятия решений часто является слишком трудоемкой для одного человека. Однако применение метода позволяет разбить большую задачу, на ряд малых самостоятельных задач. Благодаря этому для подготовки принятия решения можно привлечь экспертов, работающих независимо друг от друга над локальными задачами.

Метод дает только способ рейтингования альтернатив, но не имеет внутренних средств для интерпретации рейтингов, т.е. считается, что лицо принимающее решение (ЛПР), зная рейтинг возможных решений, должен в зависимости от ситуации сам сделать вывод. Это следует признать недостатком метода.

Очевидно, что эффективность и достоверность результата применения методов «попарного сравнения» и МАИ снижается при увеличении числа сравниваемых вариантов компоновок НО, кроме того эти методы сравнения в значительной степени субъективны и не учитывают риски принятия решения. Основным недостатком МАИ также является то, что сравнение вариантов по предпочтительности относительно каждого из критериев следует проводить по шкалам отношений, но эти шкалы не связаны ни между собой, ни с приоритетами групп критериев сравнения [65, 92, 95].

За основу предлагается взять метод упорядочения критериев с заданием уровней притязания [96].

Метод сводится к ранжированию критериев и определению предельных значений каждого из них. Допустимым является решение, удовлетворяющее системе неравенств:

$$F_1(X) \leq D_1, \quad (3)$$

$$F_k(X) \leq D_k,$$

где $F_1(X), F_k(X)$ - параметры, определяющие основные эксплуатационно-технологические свойства выбираемой компоновки насосного оборудования, $D_1 \dots D_k$ - соответствующие предельные значения параметров определенные в ТС и нормативных документах.

Для критерия надежность допустимым является решение $F_{\text{вбр}}(X) \geq D_{\text{вбр}}$, где предельным значением является вероятность безотказной работы комплектующего изделия применяемого в конструкции НО.

Применяя рассмотренный метод, выбор компоновки НО целесообразно проводить с применением метода прямого выбора, когда компоновки выбираются из массива базы предыдущих проектов по соответствуанию всем основным требованиям ТС в соответствии с выражением (3). Однако такой способ выбора компоновки приемлем в крайне редких случаях, так как выбор одной оптимальной компоновки из массива по всем эксплуатационно-технологическим, эргономическим и экономическим параметрам крайне затруднен.

Таким образом, задача выбора оптимального компоновочного решения НО на начальном этапе технического проектирования - это задача многокритериальной нелинейной оптимизации [96-98].

Задачи нелинейной многокритериальной оптимизации и методы их решения

Особенностями оценки сложных систем, к которым относится насосное оборудование для АЭС, в условиях неопределенности являются:

1. Наличие в управляющей системе ЛПР, которое осуществляет управление на основе субъективных моделей, что в свою очередь может привести к большому разнообразию поведения системы.

2. На этом этапе оценки ситуации в ряде случаев исходят не из фактической ситуации, а из той модели, которую использует ЛПР.

3. В процессе принятия решений важную роль играют логические рассуждения ЛПР, не поддающиеся формализации классическими методами математики.

4. При выборе управляющего воздействия ЛПР может оперировать нечеткими понятиями, отношениями и высказываниями.

5. В большинстве классов задач управления автоматизированными системами (АСУ) отсутствуют объективные критерии оценивания достижения целевого и текущего состояния объекта управления (ОУ), а также статистических данных для определения вероятностных законов для конкретного принятого решения.

Таким образом, методы принятия решений, используемые для детерминированных и вероятностных решений, для данного класса задач неприменимы, поэтому для оценки систем в условиях не стохастической неопределенности используются методы, в основе которых лежит матрица эффективности, таблица 7.

Таблица 7 - Матрица эффективности

<i>Управляемые параметры</i>	<i>Неуправляемые параметры</i>				<i>Эффективность системы</i> <i>K(a_i)</i>
	<i>a_i</i>	<i>n₁</i>	<i>n₁</i>	...	
<i>a₁</i>	<i>k₁₁</i>	<i>k₁₂</i>	...	<i>k_{1l}</i>	
<i>a₂</i>	<i>k₂₁</i>	<i>k₂₂</i>	...	<i>k_{2l}</i>	
...	
<i>a_m</i>	<i>k_{m1}</i>	<i>k_{m2}</i>	...	<i>k_{ml}</i>	

В таблице 7 введены следующие обозначения: a_i - вектор управляемых параметров, определяющих свойства системы, ($i=1, \dots, m$); n_j - вектор

неуправляемых параметров, определяющих состояния обстановки ($j=1,\dots,l$); k_{ij} - значение эффективности системы a_i для состояния обстановки n_j ; $K(a_i)$ - эффективность системы a_i .

В зависимости от характера неопределенности операции делятся на: игровые и статистические.

В игровых операциях неопределенность вносит своими сознательными действиями противник (теория игр).

Условия статистически неопределенных операций зависят от объективной действительности (природы). Природа пассивна по отношению к лицу, принимающему решение – теория статистических решений [98,99].

Принятие решений в условиях неопределенности

Прежде всего, надо отметить принципиальное различие между стохастическими факторами, приводящими к принятию решения в условиях риска, и неопределенными факторами, приводящими к принятию решения в условиях неопределенности. И те, и другие приводят к разбросу возможных исходов результатов управления. Но стохастические факторы полностью описываются известной стохастической информацией, эта информация и позволяет выбрать лучшее в среднем решение. Применительно к неопределенным факторам подобная информация отсутствует. В общем случае неопределенность может быть вызвана либо противодействием разумного противника, либо недостаточной осведомленностью об условиях, в которых осуществляется выбор решения. Принятие решений в условиях разумного противодействия является объектом исследования теории игр. В данном исследовании теория игр не применима, т.к. оцениваемая конструкция насосного оборудования должна соответствовать определенным требованиям ТС. Выбор компоновочного решения проводится на начальном этапе технического проектирования, когда еще не все параметры конструкции можно выразить в конкретных величинах. Таким образом, выбор производится в условиях недостаточной осведомленности.

Рассмотрим принципы выбора решений при наличии недостаточной осведомленности относительно условий, в которых осуществляется выбор. Такие ситуации принято называть «играми с природой».

В терминах «игр с природой» задача принятия решений может быть сформулирована следующим образом. Пусть ЛПР, может выбрать один из m возможных вариантов своих решений: x_1, x_2, \dots, x_m и пусть относительно условий, в которых будут реализованы возможные варианты, можно сделать n предположений: y_1, y_2, \dots, y_n . Оценки каждого варианта решения в каждом из (x_j, y_i) известны и заданы в виде матрицы выигрышей лица, принимающего решения: $A = [a_{ij}]$. Оценки каждого варианта решения определяются экспертным методом.

Предположим вначале, что априорная информация о вероятностях возникновения той или иной ситуации отсутствует. Теория статистических решений предлагает несколько критериев оптимальности выбора решений. Выбор того или иного критерия не формализуем, он осуществляется человеком, принимающим решения, субъективно, исходя из его опыта, интуиции и знаний о свойствах исследуемого объекта [98,99].

Классические критерии принятия решений

1. Критерий среднего выигрыша. Данный критерий предполагает задание вероятностей состояния обстановки P_j . Эффективность системы оценивается как среднее ожидаемое значение оценок эффективности по всем состояниям обстановки

$$K_{(a_i)} = \sum_{j=1}^l P_j k_{ij}, \quad i = \overline{1, m}, j = \overline{1, l} \quad (4)$$

оптимальной системе будет соответствовать эффективность

$$K_{\text{опт}} = \max_i \sum_{j=1}^l P_j k_{ij}, \quad i = \overline{1, m}, j = \overline{1, l} \quad (5)$$

2. Критерий минимакса

Выбор решения, при котором минимизируются максимальные потери. Это наиболее осторожный подход к принятию решений и наиболее учитывающий все возможные риски.

$$K(a_i) = \max_j \Delta k_{ij}, \quad (6)$$

$$K_{\text{опт}} = \min_i (\max_j \Delta k_{ij}). \quad (7)$$

где Δk_{ij} – величина потерь.

3. Критерий максимакса. Этим критерием предписывается оценивать системы по максимальному значению эффективности и выбирать в качестве оптимального решения обследующую эффективность с наибольшим из максимумов:

$$K(a_i) = \max_j k_{ij}, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, l} \quad (8),$$

$$K_{\text{опт}} = \max_i (\max_j k_{ij}), \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, l} \quad (9).$$

Это самое оптимистическое решение. При этом риск максимален.

4. Критерий Лапласа. Поскольку вероятности возникновения той или иной ситуации y_j неизвестны, будем их все считать равновероятными. Тогда для каждой строки матрицы выигрышей подсчитывается среднее арифметическое значение оценок.

Оптимальному решению будет соответствовать такое решение, которому соответствует максимальное значение этого среднего арифметического, т. е.

$$K_{\text{опт}} = \max_{1 \leq i \leq m} \frac{1}{l} \sum_{j=1}^l \alpha_{ij}. \quad (10)$$

5. Критерий Вальда. В каждой строчке матрицы выбираем минимальную оценку. Оптимальному решению соответствует такое решение, которому соответствует максимум этого минимума, т. е.

$$K_{\text{опт}} = \max_{1 \leq i \leq m} \min_{1 \leq j \leq l} a_{ij}. \quad (11)$$

При этом критерии за оптимальный результат принимается результат, который в наихудших условиях дает максимальный выигрыш. Применение этого критерия ориентировано на самые неблагоприятные условия.

6. *Критерий Сэвиджа.* В каждом столбце матрицы находится максимальная оценка $\max_{1 \leq i \leq m} a_{ij}$ и составляется новая матрица, элементы которой определяются соотношением

$$r_{ij} = \max_{1 \leq i \leq m} a_j - a_{ij}. \quad (12)$$

Величину r_{ij} называют риском, под которым понимают разность между максимальным выигрышем, который имел бы место, если бы было достоверно известно, что наступит ситуация y_j , и выигрышем при выборе решения x_i в условиях y_j .

Эта новая матрица называется *матрицей рисков*. Далее из матрицы рисков выбирают такое решение, при котором величина риска принимает наименьшее значение в самой неблагоприятной ситуации, т.е.

$$\begin{aligned} K_{\text{опт}} &= \min_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq l} r_{ij} = \\ &\min_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq l} (\max_{1 \leq i \leq m} a_{ij} - a_{ij}). \end{aligned} \quad (13)$$

Сущность этого критерия заключается в минимизации риска. Как и критерий Вальда, критерий Сэвиджа очень осторожен. Они различаются разным пониманием худшей ситуации: в первом случае — это минимальный выигрыш, во втором — максимальная потеря выигрыша по сравнению с тем, чего можно было бы достичь в данных условиях [98,99].

Для решения задачи настоящего исследования выбран критерий оптимальности — критерий Сэвиджа. Данный критерий оптимальности позволяет выбрать компоновочное решение НО с минимальным риском несоответствия выбранного решения требованиям ТС.

Задача выбора оптимального компоновочного решения из множества вариантов с учетом ограничений это задача многокритериальной нелинейной оптимизации или задача теории принятия решений.

Задачи этой теории можно разделить на классы: поисковые; распределенные; управление запасами; массового обслуживания; календарного планирования и другие.

Классы и методы решения задач теории принятия решений представлены в таблице 8 [80].

Таблица 8 - Классы задач принятия решений и методы их решений

<i>Класс задач</i>	<i>Методы решения</i>
Поисковые	Нелинейное программирование
Распределенные	Линейное программирование
Управление запасами	Теория управления запасами
Массовое обслуживание	Теория массового обслуживания
Календарное планирование	Теория расписания
Состязательные задачи	Теория игр
Неформальные задачи	Экспертный метод

Как отмечалось, задача выбора оптимальной компоновки рассматривается на начальном этапе технического проектирования, зачастую при отсутствии достаточного количества статистических данных. Поэтому сравнение компоновок это неформальная задача и решается она с применением метода экспертных оценок.

Математическая постановка задачи

Математическую задачу можно определить следующим образом - оптимальное компоновочное решение насосного оборудования, соответствующее заданным в ТС критериям, можно оценить по значениям определенного набора частных показателей качества.

Требуется определить вектор конструктивных параметров насосного оборудования Y , представляемый в виде целевой функции $F(X; Q)$, связывающей параметры и характеристики изделия X на множестве ограничений Q (ограничений по габаритным параметрам, требованиям по надежности, безопасности и др. требования согласно ТС, ГОСТ 4.118, ГОСТ 24656-81).

Введём обозначения

$X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ - вектор управляемых параметров;

$Y=(y_1, y_2, \dots, y_m)$ - вектор выходных параметров;

$Q=(q_1, q_2, \dots, q_l)$ – вектор ограничений (внешних параметров);

Y есть функция от X и Q , то в явном виде она имеет следующий вид

$$Y=F(X, Q) \text{ — математическая модель. (14)}$$

Таким образом, оптимальность компоновочного решения характеризуется зависимостью:

$$Y = F(X; Q), \quad x \in X; q \in Q; y \in Y, \quad (15)$$

где $X = X (K_{\text{сумм_опр}}, R_{\max})$ — вектор конструктивных параметров продукции; $K_{\text{сумм_опр}}$ — комплексный показатель технологичности конструкции изделия (ТКИ) или определяющий показатель качества конструкции по техническим параметрам; R_{\max} — максимальный риск выбора компоновочного решения на начальном этапе проектирования

$$Q = Q \begin{Bmatrix} X_u & Y_u & Z_u & n_u \\ V_u & D_3 & L_3 & \dots \\ K_{\text{окр}} & R_{\text{окр}} & \dots & \dots \end{Bmatrix} \text{ — вектор ограничений, (16)}$$

где X_u, Y_u, Z_u, n_u — количество и местоположение компонуемых изделий в блоке; V_u — ограничения минимального объема свободного технологического пространства на компонуемое изделие; D_3, L_3 — геометрические ограничения машинного зала; $K_{\text{окр}}$ — технологически-эксплуатационные ограничения компоновки различных типов изделий; $R_{\text{окр}}$ — эргономические факторы для отдельных компонуемых изделий; ... — прочие конструктивные параметры, характеризующие геометрические параметры машинного зала и требования нормативно-технической документации (НТД).

Параметры Q задаются генеральным проектировщиком и являются неизменяемыми ограничениями.

Тогда далее, по умолчанию, будем считать, что $Y=F(X)$, и рассматривать детерминированную модель:

$$Y_{\text{опт}} = F (\max K_{\text{сумм_опр}}); (\min R_{\max}). \quad (17)$$

За результат решения задачи $Y_{\text{опт}}$ принимается утверждение компоновки оборудования с максимальным значением $K_{\text{сумм_опр}}$ и минимальным значением R_{\max} . Минимальное значение критерия риска является критерием оптимального выбора компоновки.

$K_{\text{сумм_опр.}}$ – определяющий показатель качества продукции, это комплексный показатель качества, его величина определяется как свертка показателей качества, зависимость 18:

$$K_{\text{сумм_опр}} = F(K_j). \quad (18).$$

Определяющий показатель качества продукции, это показатель качества по которому принимается решение оценивать качество продукции [92, 100].

Функциональный способ нахождения определяющего показателя качества предпочтительнее, но не всегда возможен по ряду причин. Одна из них состоит в том, что получить функциональную зависимость, учитывающую большое число единичных показателей качества практически очень сложно. Если определяющий показатель качества не выразить через единичные показатели качества с помощью объективной зависимости, применяют субъективный способ свертки единичных показателей по принципу среднего взвешенного. Субъективным в этом случае является лишь параметр логики усреднения, сам же комплексный показатель - объективная количественная характеристика качества объекта. В общем виде определяющий показатель качества проекта насосного оборудования (K) по принципу среднего взвешенного включает набор показателей качества (K_j), который можно представить по выражению 19:

$$K^{\Omega} = \sqrt[n]{\frac{\sum_{j=1}^n \alpha_j K_j}{\sum_{j=1}^n \alpha_j}}, \quad (19)$$

где n – параметр логики усреднения; α_j – весовой коэффициент по j -му показателю качества; K_j – значение j -го показателя качества, n - число показателей качества K_j [92].

Расчет определяющего показателя качества компоновки изделия производится по следующему алгоритму: выбор номенклатуры единичных и комплексных показателей качества компоновки изделия; составление квалиметрической модели; расчёт численного значения определяющего показателя качества [101-103].

2.3 Алгоритм выбора оптимального компоновочного решения

При решении задачи выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования, соответствующего требованиям технической спецификации, возможны два варианта: построение компоновочной схемы непосредственно по полученным исходным данным (т.е. синтез новой конструкции) или сравнение аналогов из базы предыдущих проектов с требованиями ТС и выбор наиболее соответствующего предыдущего проекта.

Таким образом, для реализации предложенных решений задачи оценки и выбора оптимального компоновочного решения предлагается использовать следующий алгоритм, состоящий из трех частей:

- оценка и выбор компоновочного решения проектируемого оборудования при наличии подходящих решений из базы проектов и отсутствии синтезированных компоновочных решений;
- оценка и выбор синтезированных компоновочных решений проектируемого оборудования при отсутствии подходящих решений из базы проектов;
- оценка и выбор проектов подобранных из базы проектов и синтезированных компоновочных решений.

В случае отсутствия подходящего компоновочного решения из базы проектов и синтезированного компоновочного решения, соответствующих требованиям ТС, конструктор обращается к разработчику ТС за корректировкой требований. Блок-схема алгоритма выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования приведена на рисунке 13.

Принцип работы алгоритма. При получении технической спецификации от заказчика конструктор производит выбор оптимального компоновочного решения оборудования, для этого:

- 1.1. определяется возможность синтеза новых компоновок;
- 1.2. с помощью специально разработанного программного обеспечения из массива компоновочных решений предыдущих проектов методом прямого

выбора конструктор выбирает компоновку или массив компоновок, согласно основным эксплуатационно-технологическим параметрам, определенным в ТС.

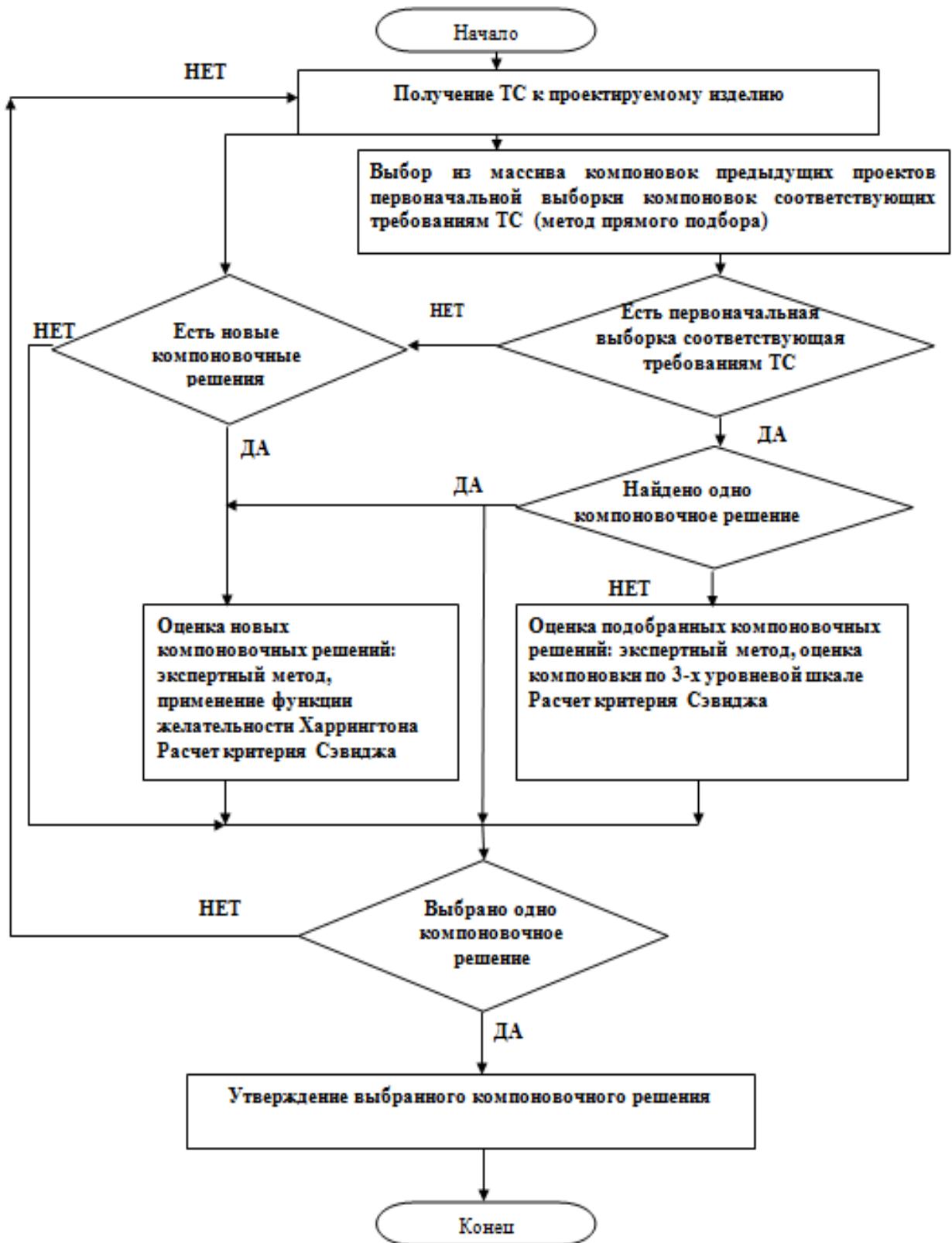


Рисунок 13 - Блок-схема алгоритма выбора компоновочного решения насосного оборудования

Если из базы проектов с применением программного обеспечения подобрано одно компоновочное решение, соответствующее заданным в ТС параметрам, оно сравнивается экспертым методом с применением функции желательности Харрингтона с синтезированным компоновочным решением (при его наличии). Производится расчет определяющего показателя качества и критерия Сэвиджа. Оптимальное компоновочное решение утверждается в качестве прототипа компоновки и дальнейшей проработки и выпуска ТЗ.

Если из базы проектов с применением программного обеспечения подобрано несколько компоновочных решений предыдущих проектов, удовлетворяющих заданным эксплуатационно-технологическим параметрам, определенным в ТС, проводится расчет определяющего показателя качества. Компоновка, подобранная из базы предыдущих проектов, с максимальным значением определяющего показателя качества сравнивается с синтезированным компоновочным решением (при его наличии) с применением функции желательности Харрингтона. Производится расчет критерия Сэвиджа. Оптимальное компоновочное решение утверждается в качестве прототипа компоновки и дальнейшей проработки и выпуска ТЗ.

Если из базы проектов с применением программного обеспечения не подобрано компоновочное решение, соответствующее заданным эксплуатационно-технологическим параметрам ТС, по возможности синтезируются новые компоновочные решения. Проводится оценка новых компоновок по основным эксплуатационно-технологическим параметрам с применением функции желательности Харрингтона, проводится расчет определяющего показателя качества и критерия Сэвиджа. Оптимальное компоновочное решение утверждается в качестве прототипа компоновки и дальнейшей проработки и выпуска ТЗ.

При отсутствии компоновочных решений из базы проектов и при отсутствии синтезированных компоновочных решений, соответствующих эксплуатационно-технологическим параметрам, заданным ТС, конструктор

обращается к разработчику ТС за корректировкой параметров к проектируемому оборудованию.

Решая рассмотренные задачи можно с большой степенью достоверности выбрать оптимальный вариант компоновки оборудования, который будет утвержден для дальнейшей конструкторской проработки, выпуска и утверждения ТЗ. На следующих этапах технического проектирования происходит более подробная «вязка» полученных компоновок по геометрическим и техническим параметрам.

Этапы алгоритма выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования

Этап 1. Расчет определяющего показателя качества компоновочного решения

В общем виде определяющий показатель качества проекта НО ($K_{\text{опр}}$) рассчитывается по принципу среднего взвешенного и включает набор показателей качества (K_j), который можно представить по выражению (19).

В подразделе 2.1.3 для выполнения экспертной оценки проекта НО определены группы показателей качества, характеризующие проект: показатели назначения; показатели технологической и энергетической эффективности; конструктивные и технологические показатели; показатели надежности; требования к безопасности и охране окружающей среды; эстетические и эргономические показатели; требования к транспортированию и хранению.

Алгоритм выбора компоновочного решения насосного оборудования основан на методе экспертных оценок [80], для реализации этого метода проводится расчет весовых коэффициентов, оценка согласованности мнений экспертной группы и экспертная оценка рассматриваемого изделия.

Расчет весовых коэффициентов

Экспертная оценка проводится группой экспертов от 3 до 15 членов, по опросным листам [92, 104, 105]. В опросных листах определен специальный набор показателей качества НО на начальном этапе технического проектирования.

Показатели качества неравнозначно важны для утверждения оптимальной компоновки, поэтому проводится расчет весовых коэффициентов a_j . Эксперты проводят ранжирование показателей качества.

Оценку степени значимости показателей качества (технических характеристик) насосного оборудования эксперты производят путем присвоения им рангового номера. Ранг 1 присваивается показателю качества с наивысшей оценкой данной экспертом. Ранг n присваивается показателю качества с наименьшей оценкой данной экспертом.

Однаковый ранговый номер присваивается показателям качества равнозначным с точки зрения эксперта.

Сводная таблица рангов показателей качества, составленная по результатам данных анкетного опроса экспертной группы, представлена в таблице 9.

Таблица 9 – Ранги показателей качества

<i>№ n./n.</i>	<i>Показатель качества</i>	<i>Ранговые оценки показателей качества</i>					<i>Сумма рангов</i>	<i>Номер ранга в упорядоченном ряду $R_{j(1)}$</i>	<i>Номер ранга в упорядоченном ряду $R_{j(2)}$</i>			
		<i>Эксперты (m)</i>										
		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>...</i>	<i>i</i>	<i>m</i>						
1	K_1	A_{11}	A_{21}	$...$	A_{i1}	A_{m1}	S_{A1}	$R_{1(1)}$	$R_{1(2)}$			
2	K_2	A_{12}	A_{22}	$...$	A_{i2}	A_{m2}	S_{A2}	$R_{2(1)}$	$R_{2(2)}$			
...			
j	K_j	A_{1j}	A_{2j}	$...$	A_{ij}	A_{mj}	S_{Aj}	$R_{j(1)}$	$R_{j(2)}$			
n	K_n	A_{1n}	A_{2n}	$...$	A_{in}	A_{mn}	S_{An}	$R_{n(1)}$	$R_{n(2)}$			

Подсчитывается суммы рангов S_{Aj} по столбцам таблицы 9, выражение (20):

$$S_{Aj} = \sum_{i=1}^m A_{ij}, \quad (20)$$

где j – номер показателя качества; i – условный номер эксперта; A_{ij} – ранг j -го показателя качества, присвоенный i -м экспертом; m – число опрошенных экспертов.

Ранг A_{ij} – является показателем степени влияния (весомости) j -го показателя качества для оцениваемой продукции.

Обработка результатов опроса позволяет провести первичную обобщенную ранжировку показателей качества.

Первичный ранг $R_{j(1)} = 1$ получает показатель качества j с наименьшей суммой рангов S_{A_j} . При ранжировании показателей качества могут появляться связанные ранги (одинаковый ранговый номер).

В этом случае проводят переформирование рангов [106]. Переформирование рангов производится без изменения мнения эксперта, то есть между ранговыми номерами должны сохраняться соответствующие соотношения (больше, меньше или равно).

Также ранг не может быть ниже 1 и выше значения равного количеству параметров n . Если показатели качества K_i, K_{i+1}, K_{i+2} имеют одинаковые ранги и разделяют соответственно места: $(i), (i+1)$ и $(i+2)$, то их переформированный ранг будет равен:

$$A_{ij} = i + (\sum_{q=1}^t q)/t, \quad (21)$$

где i – порядковый номер по весомости первого из группы показателей качества, имеющих одинаковые ранги A_{ij} ; t – количество показателей качества с одинаковыми рангами; q – индекс увеличения места ранга.

После переформирования рангов по оценкам каждого специалиста их сумма по строке должна быть равна:

$$\sum_{j=1}^n A_{ij} = \sum_{j=1}^n j. \quad (22)$$

Точно так же, как и при первичной обработке результатов опроса, определяются S_{A_j} – суммы рангов по столбцам (20) и R_j – вторичные ранги. Значение весового коэффициента α_j определяется выражением (23):

$$\alpha_j = \frac{\beta_j}{\sum_{j=1}^n \beta_j}, \text{ где } \beta_j = \frac{1}{S_{A_j}} \quad (23)$$

важно, что $\sum_{j=1}^n \alpha_j = 1$.

Оценка согласованности мнений экспертной группы

При проведении экспертных оценок очень важно снизить субъективную составляющую оценки и сформировать компетентную экспертную группу. Для этого с помощью тестового задания, проводится количественная оценка согласованности мнений экспертов по критерию Кендалла (коэффициент конкордации), выражение 24 [107].

$$W = \frac{(12 \cdot \sum_{j=1}^n D_j^2)}{m^2 \cdot (n^3 - n) - m \cdot \sum_{i=1}^m T_i}, \quad (24)$$

где D_j – отклонение суммы рангов S_{Aj} для j -го показателя качества от общей средней суммы рангов S_A , m – число опрошенных экспертов; n – количество оцениваемых показателей качества.

$$D_j = |S_{Aj} - S_A|, \text{ где } S_A = (\sum_{j=1}^n S_{Aj})/n, \quad (25)$$

где T_i – параметр связи рангов в мнениях i -го эксперта.

$$T_i = \sum_{l=1}^{L_i} (t_i^3 - t_i), \quad (26)$$

где L_i - число связок (видов повторяющихся элементов) в оценках i -го эксперта, t_l - количество элементов в l -й связке для i -го эксперта (количество повторяющихся элементов).

Коэффициент конкордации принимает значения от 0 (мнения экспертов не согласованы) до 1 (полное согласие мнений экспертов). Статистическую значимость коэффициента W оценивают при помощи критерия Пирсона X_p^2 , при $n \geq 7$, выражение (23):

$$X_p^2 = m \cdot (n - 1) \cdot W \quad (27)$$

Предположение о наличии согласия между экспертами принимается, если $X_p^2 > X_T^2$

X_T^2 определяется из таблицы критерия X_T^2 для принятой доверительной вероятности P или заданном уровне значимости α и числе степеней свободы $f = n - 1$.

Если $X_P^2 < X_T^2$ то необходимо провести повторное анкетирование, так как либо квалификация экспертов недостаточна, либо высока сложность оцениваемого объекта. Важно, что уровень значимости α для оценок результатов в атомной энергетике установлен не ниже 0,05 [108].

Оценка компоновочного решения при наличии подходящих компоновочных решений из базы проектов

Проводится оценка компоновок из базы проектов, на соответствие требованиям ТС. Применяется экспертный метод, оценки выставляются по трехбалльной шкале [92, 101, 104]:

4 балла — компоновка превышает требования ТС по n -му показателю качества;

2 балла — компоновка соответствует требованиям ТС n -му показателю качества;

0 баллов — компоновка не соответствует требованиям ТС n -му показателю качества.

Определяющий показатель качества каждой подобранный компоновки НО рассчитывается в виде свертки комплексных и единичных показателей качества, указанных в таблице 10. Свертка единичных показателей групп 1-3, 6, 7 рассчитывается как среднее арифметическое взвешенное, показателей 4, 5 как среднее геометрическое взвешенное, тогда определяющий показатель качества рассчитывается как смешанное среднее, выражение (28).

Сравнение множества вариантов компоновки (k) производится фиксированным числом экспертов (m) по фиксированному количеству показателей качества (n). Оценки выставляются в разработанных опросных листах.

В таблице оценки в ячейке на пересечении показателя качества и номера оцениваемой компоновки по принятой бальной системе экспертом проставляется оценка n -го показателя качества в k -й компоновке относительно требований указанных в ТС.

Таблица 10 - Квалиметрическая модель оценки проекта насосного оборудования из базы проектов

<i>Наименование группы показателей качества продукции</i>	<i>Единичные и комплексные показатели качества, параметры сравнения</i>	<i>Свертка показателя</i>
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
1. Показатели назначения	1.1. Подача	$K_1 = \frac{\sum_{j=1}^4 \alpha_1 \cdot K_j}{\sum_{j=1}^4 \alpha_1}$
	1.2 Напор	
	1.3 Частота вращения	
	1.4 Коэффициент быстроходности	
2. Показатели технологической и энергетической эффективности	2.1 КПД	$K_2 = \frac{\sum_{j=1}^2 \alpha_2 \cdot K_j}{\sum_{j=1}^2 \alpha_2}$
	2.2 Кавитационный запас	
3. Конструктивные и технологические показатели	3.1 Весовое совершенство	$K_3 = \frac{\sum_{j=1}^2 \alpha_3 \cdot K_j}{\sum_{j=1}^2 \alpha_3}$
	3.2 Соответствие геометрии маш.зала (компоновка боксов и расположение вспомогательных систем)	
4. Показатели надежности	4.1 Коэффициент готовности	$K_4 = \sqrt[6]{\prod_{j=1}^6 K_j^{\alpha_4}}$
	4.2 Ремонтопригодность	
	4.3. Сохранность в упаковке	
	4.4 Средний ресурс между средними ремонтами	
	4.5 Средняя наработка на отказ	
	4.6 Назначенный срок службы	
5. Требования к безопасности и охране окружающей среды	5.1 Механическая безопасность	$K_5 = \sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 K_i^{\alpha_5}}$
	5.2 Электрическая безопасность	
	5.3. Термическая безопасность	
	5.4 Внешняя утечка	

I	2	3
6. Эстетические и эргономические показатели	6.1 Вибрация 6.2 Шум 6.3. Внешняя доступность для ремонта электродвигателя 6.4. Расположение регулировочных и соединительных элементов 6.5. Потребность в высококвалифицированном обслуживающем персонале (шефмонтаж, авторский надзор)	$K_6 = \frac{\sum_{j=1}^5 \alpha_6 \cdot K_j}{\sum_{j=1}^5 \alpha_6}$
7. Требования к транспортированию и хранению	7.1 Расположение элементов раскрепления 7.2 Сохранность без упаковки	$K_7 = \frac{\sum_{j=1}^2 \alpha_7 \cdot K_j}{\sum_{j=1}^2 \alpha_7}$
Определяющий показатель качества оценки проекта ($K_{\text{суммк}}$)		$\bar{K} = (K_1 + K_2 + K_3 + K_6 + K_7)/5 + \sqrt[2]{K_4 \cdot K_5} \quad (28)$

Суммарный определяющий показатель качества $K_{\text{сумм_опр}}$ для k -го компоновочного решения подобранного из базы компоновочных решений рассчитывается по выражению (29):

$$K_{\text{сумм_опр}K} = \frac{\sum_{i=1}^m K_{\text{суммк}}}{m}. \quad (29)$$

Оценка синтезированного компоновочного решения и компоновочных решений из базы проектов

В случае синтеза нескольких компоновочных решений и наличия решения из базы предыдущих проектов, удовлетворяющего требованиям ТС, сравнение компоновок проводится также экспертным методом с расчетом определяющего

показателя качества. Оценки компоновочных решений производятся экспертным методом применением функции желательности Харрингтона.

Применение функции желательности Харрингтона по сравнению с бальной системой дает большую достоверность принятия решений, что очень важно при оценке абсолютно новых компоновочных решений, не имеющих референции [109, 110].

Нередко при оценивании альтернатив возникает необходимость в использовании измерений с помощью специально разрабатываемых вербально-числовых шкал, применяемых преимущественно в случаях, когда оценки носят субъективный характер, в частности, при экспертном оценивании. Эти шкалы носят название психофизических и позволяют формализовать имеющуюся у эксперта систему предпочтений.

Психофизические шкалы задаются функциями специального вида — функциями желательности и устанавливают соответствие между натуральными значениями показателей в физических шкалах и психофизическими параметрами — субъективными оценками «ценности» этих значений. Обычно функцию желательности $d(x)$ строят таким образом, чтобы в наиболее распространенной области «удовлетворительно» она была близка к линейной функции и в то же время изменялась от 0 до 1 на всем возможном множестве значений показателя. Понятно, что при таком подходе к нормированию функция желательности должна быть более «чувствительна» к изменению значений информативного показателя x в области «удовлетворительно» и менее чувствительна вне ее.

Одной из самых известных и часто используемых является функция желательности Харрингтона, она впервые была применена для решения задач контроля качества массовой продукции. Шкала Харрингтона устанавливает соответствие между лингвистическими оценками желательности значений показателя x и числовыми интервалами $d(x)$, таблица 11.

При такой шкале значения функции желательности $d(x)$ изменяются в интервале от 0 до 1, причем значение $d_i \approx 0$ соответствует абсолютно неприемлемой величине j -го показателя качества, $d_i \approx 1$ — идеальной величине.

Функция желательности Харрингтона представляет собой монотонно возрастающую функцию, изменяющуюся от 0 до 1.

Вычисляют показатели желательности, выражение (30):

$$d = \exp\left(-\frac{1}{y}\right) = \frac{1}{e^{1/y}}, \quad (30)$$

где y – вспомогательный показатель (частный параметр оптимизации), $0 < y < \infty$

Таблица 11 - Числовые интервалы шкалы Харрингтона

<i>Лингвистическая оценка</i>	<i>Интервалы значений функции желательности $d(x)$</i>
Очень хорошо	1,00-0,80
Хорошо	0,80-0,63
Удовлетворительно	0,63-0,37
Плохо	0,37-0,20
Очень плохо	0,20-0,00

Размерные значения x_j натуральных показателей качества пересчитывают в безразмерные вспомогательные показатели y , выражение (31):

$$y = a_0 + a_1 x_j. \quad (31)$$

Чтобы найти коэффициенты a_0 , a_1 , необходимо иметь нормативные значения показателей желательности d , значения безразмерных показателей y , а также значения размерных показателей x_j для двух уровней градаций качества.

Важно, что начало расчета диапазона изменения показателя качества может рассчитываться как от минимального значения, так и максимального. Например, наработка на отказ: чем больше значение этого параметра, тем лучше. Первый интервал для этого показателя начинается с минимального значения. Распределение интервалов при оценке себестоимости начинается с максимально допустимой суммы. Последний интервал – отличный объект по данному признаку – соответствует минимальному значению себестоимости.

Промежуточные значения частных желательностей можно установить, используя линейное преобразование представлений частных параметров

оптимизации в условном масштабе. Для определения коэффициентов a_0 , a_1 используются две ранее установленные точки. Подставив в уравнение (31) соответствующие значения y и x , получим систему из двух уравнений, совместное решение которых позволит определить величину коэффициентов a_0 , a_1 . После подстановки найденных коэффициентов в уравнение (31) можно определить любое значение y и значение функции желательности по величине именованного параметра оптимизации. Значения функции желательности в основных промежуточных точках:

<i>Числовые значения</i>	<i>y</i>	0	0,5	0,77	1,00	1,5	2,00	2,50	3,00	4,00	4,50	5,00
	<i>d</i>	0	0,14	0,28	0,37	0,51	0,61	0,67	0,72	0,78	0,80	0,82

Таким образом, если есть новые компоновочные решения и решения из базы проектов, удовлетворяющие требованиям ТС, сравнение компоновок проводится также экспертным методом с расчетом определяющего показателя качества. Оценка проводится по показателям качества и группам показателей качества, приведённым в таблице 6. Оценки выставляются по шкале желательности Харрингтона, графически представленной на рисунке 14.

Где d_j —оценка по j -му показателю для k -й компоновки, определяется согласно функции желательности Харрингтона:

- $d_j \in [0;0,2]$ — очень плохие данные по оцениваемому показателю качества;
- $d_j \in (0,2 ;0,37]$ — плохие данные по оцениваемому показателю качества;
- $d_j \in (0,37;0,63]$ — удовлетворительные данные по оцениваемому показателю качества;
- $d_j \in (0,63;0,8]$ — хорошие данные по оцениваемому показателю качества;
- $d_j \in (0,8;1,0]$ — отличные данные по оцениваемому показателю качества.

Определяющий показатель качества каждого оцениваемого проекта $K_{\text{сумм}k}$, рассчитывается по дополненной автором формуле Харрингтона, как среднее геометрическое взвешенное, выражение (32)

$$K_{\text{сумм}k} = D = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n d_j^{\alpha_j}}. \quad (32)$$

Суммарный определяющий показатель качества $K_{\text{сумм_опр}}$ для k -го компоновочного решения рассчитывается по выражению (29).

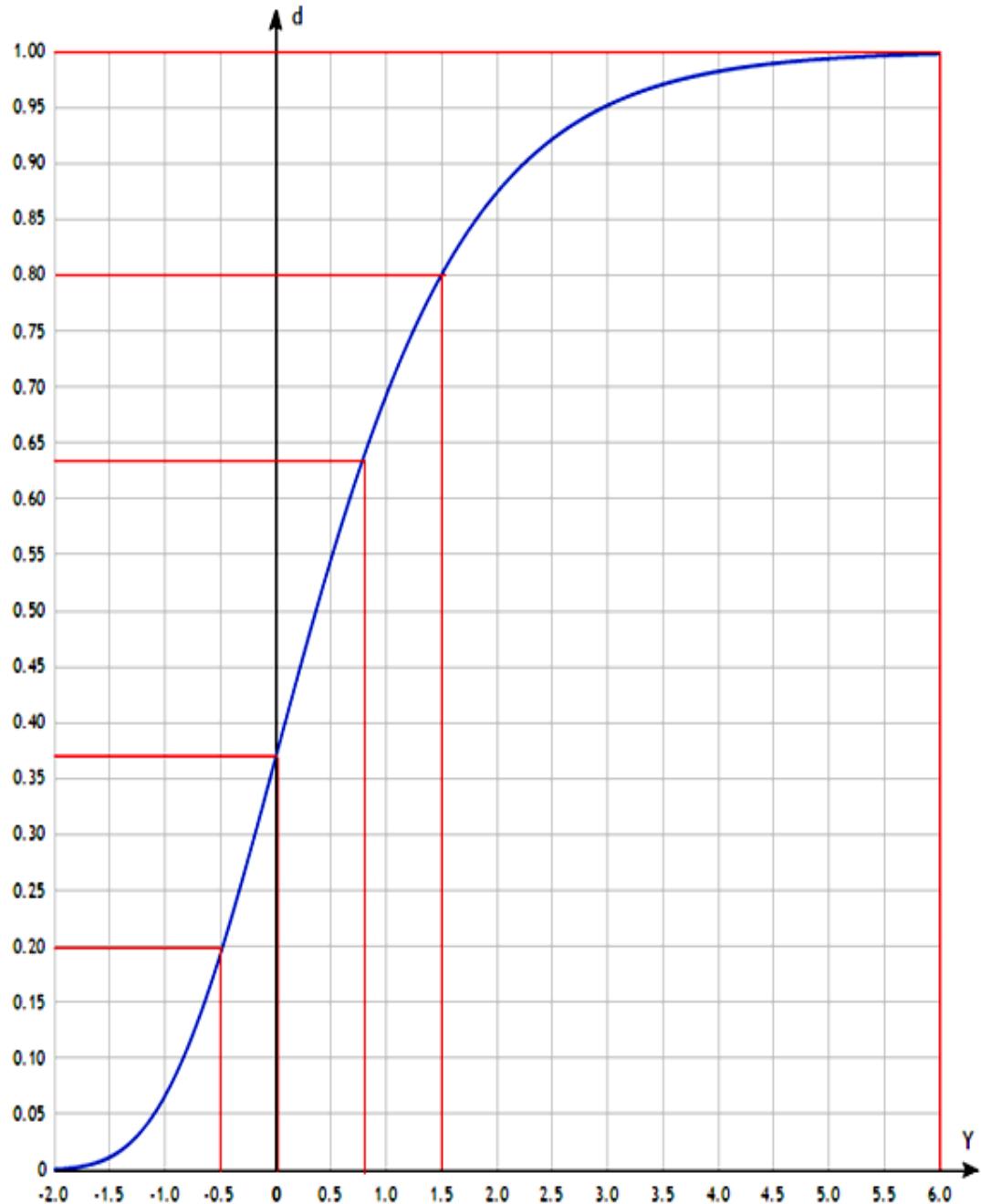


Рисунок 14. График зависимости Харрингтона

Этап 2. Оценка рисков по критерию Сэвиджа

Вопрос выбора компоновочного решения насосного оборудования на начальном этапе технического проектирования это вопрос принятия решения в условиях неопределенности.

Решение таких задач рассматривается в теории «игр с природой». Задача лица, принимающего решение, выбрать оптимальную конструкцию с минимальными рисками. В данной работе применен критерий Сэвиджа принятия решения.

На практике, выбирая одно из возможных решений, часто останавливаются на том, осуществление которого приведет к наименее тяжелым последствиям, если выбор окажется ошибочным.

Критерий Сэвиджа часто применяется в задачах «игр с природой». По принципу Сэвиджа каждое решение характеризуется величиной дополнительных потерь, которые возникают при реализации этого решения, по сравнению с реализацией решения, правильного при данном состоянии природы.

Естественно, что правильное решение не влечет за собой никаких дополнительных потерь, их величина равна нулю.

При выборе решения, наилучшим образом соответствующего различным состояниям природы, следует принимать во внимание только эти дополнительные потери, которые по существу, являются следствием ошибок выбора.

Для решения задачи строится «матрица рисков», элементы которой показывают, какой убыток понесет ЛПР в результате выбора неоптимального варианта решения.

Критерий Сэвиджа рекомендуется применять в условиях неопределенности при выборе решения, критерий позволяет выбрать решение с минимальным значением максимального риска [98], выражения (12, 13).

В таблице 12 приведен пример матрицы рисков при сравнении четырех компоновочных решений насосного оборудования подобранных из базы проектов.

Таблица 12 - Матрица рисков выбора компоновочного решения насосного оборудования из базы проектов

<i>A</i> <i>(альтернативы варианты компоновок HO)</i>	<i>R (риски) по показателям качества</i>							<i>R_{max}</i> <i>(максимальный риск)</i>
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	
<i>A1 (1714)</i>	0	0	0,185	0,019	0,024	0,034	0,046	0,185
<i>A2 (1716)</i>	0	0	0,027	0	0	0	0,031	0,031
<i>A3 (1716-01)</i>	0	0,197	0,000	0	0,018	0,051	0,00	0,197
<i>A4 (1716-02)</i>	0	0,197	0,053	0,010	0,018	0,056	0,031	0,197

Компоновка с максимальным значением суммарного определяющего показателя качества $K_{\text{сумм_опр}}$ и минимальным значением R_{\max} , утверждается для дальнейшей конструкторской проработки и выпуска ТЗ.

Управление риском производится путем принятия в дальнейшую разработку компоновочного решения с минимальным значением критерия риска – критерия Сэвиджа.

В целях снижения субъективных ошибок при проведении расчетов по предложенному алгоритму было разработано программное обеспечение. Принцип работы и экранные формы программного обеспечения подробно рассмотрены в третьей главе.

2.4 Выводы к главе 2

По результатам проведенных в главе 2 исследований можно сделать следующие выводы.

1. На начальном этапе технического проектирования насосного оборудования для АЭС, зачастую при отсутствии прототипов, оценку компоновки можно произвести только по следующим группам показателей качества: показатели назначения; показатели технической и энергетической эффективности; конструктивные и технологические показатели; показатели надежности; требования к безопасности и охране окружающей среды; эстетические и эргономические показатели; требованиям к транспортированию и хранению.

2. Установлено, что задача выбора оптимального компоновочного решения на начальном этапе технического проектирования относится к классу неформальных многокритериальных задач.

3. Проанализированы, с точки зрения выбора оптимального компоновочного решения, методы решения таких задач: метод попарного сравнения; метод анализа иерархий; метод упорядочения критериев с заданным уровнем притязательности; теория игр с природой с применением экспертного метода. Определено, что для поставленной цели исследования наилучший результат дает применение экспертного метода и инструментов теории игр с природой.

4. Проанализированы, с точки зрения выбора оптимального компоновочного решения, критерии принятия решений: критерий среднего выигрыша; критерий минимакса; критерий максимакса; критерий Лапласа; критерий Вальда; критерий Сэвиджа. Определено, что для поставленной цели исследования наилучший результат дает применение критерия Сэвиджа.

5. Для достижения поставленной цели исследования разработан алгоритм проведения экспертной оценки с расчетом средневзвешенного определяющего показателя качества, оценка рисков проводится по критерию

Сэвиджа. Согласованность мнений экспертов оценивается коэффициентом Кенделла.

6. Предложенный алгоритм позволяет выбрать оптимальное компоновочное решение в заданных ТС ограничениях, с минимальным значением критерия риска.

ГЛАВА 3 РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО КОМПОНОВОЧНОГО РЕШЕНИЯ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

3.1 Реализация алгоритма работы программного обеспечения

С целью принятия оптимального управлеченческого решения по выбору компоновочного решения насосного оборудования на начальном этапе технического проектирования автором разработан алгоритм, рассмотренный во второй главе. Данный алгоритм реализован в программном обеспечении, которое позволяет:

- проводить первоначальную выборку компоновок из базы проектов по заданным параметрам;
- реализовать алгоритм экспертной оценки;
- производить расчет проверки согласованности мнений экспертов по критерию Кенделла и оценку рисков по критерию Сэвиджа.

Важнейшим этапом процесса проектирования насосного оборудования является выбор оптимального компоновочного решения НО, такой выбор представляет собой управлеченческую задачу.

Случается, что управлеченческие решения принимаются либо в отсутствии достаточного объема статистической информации (оценка новых разработок), либо управлеченческое решение принимается руководителем при необходимости обработки большого объема информации в сжатые сроки. В таких случаях для помощи в принятии оптимального решения и снижения рисков разрабатывается специальное программное обеспечение, относящееся к системам поддержки принятия решений [111-116]. В данной главе рассматривается алгоритм и принцип работы такого программного обеспечения разработанного с участием автора [117, 118].

Цель разработки автоматизированной системы выбора компоновки

Выбор компоновки насосного оборудования осуществляется на начальном этапе технического проектирования. При выборе компоновки реализуется как системный подход, так инновационный подход, заключающийся в поиске новых конструктивных решений. Системный подход основан на базовом и агрегатно-модульном методах проектирования (или унификации), когда конструкция продукции создается на основе базовой модели с новой комбинацией усовершенствованных функциональных модулей и унифицированных отдельных элементов. Инновационный подход заключается в поиске новых конструктивных решений, оценке их возможностей и рисков применения.

Независимо от применяемого подхода по выбору компоновки, её окончательный вариант принимается в процессе совместной работы экспертов и руководителя экспертной комиссии (лица принимающего решение). Решение этого вопроса зависит от предназначения продукции, её индивидуальных характеристик, параметров, уровня унификации, условий эксплуатации, достижений и развития техники и многих других факторов, которые в обязательном порядке учитываются системой поддержки принятия решений.

Системы поддержки принятия решений (СППР) или системы интеллектуальной поддержки принятия решений (ИППР) – это компьютерные системы, использующие данные и модели, применяемые при принятии слабоформализованных решений. Данные извлекаются из системы диалоговой обработки запросов или базы данных. Пользователь работает в СППР посредством интерфейса, выбирает модель и набор данных, которые необходимо использовать. В программах СППР осуществляется распределение функций между человеком и компьютером: основная роль принятия решений в неопределенных ситуациях, анализ событий отводится человеку, компьютеру отводится роль «поддержки».

Задачи разработки автоматизированной системы выбора компоновки:

- создание пополняемой базы компоновок насосного оборудования и его составных узлов;

- автоматизация процесса оценки и выбора компоновки из базы проектов по заданным параметрам;
- автоматизация процесса сравнения новых и имеющихся компоновок.

Обзор реестра свидетельств РФ на программы для ЭВМ Федерального института промышленной собственности (ФИПС) на сайте <http://www.fips.ru> показал, что аналогов такому специальному программному обеспечению нет.

В связи с этим целесообразно разработать программное обеспечение, реализующее все необходимые функции.

3.2 Алгоритм работы пользователя с программным обеспечением

С участием автора разработано программное обеспечение «Программа по выбору компоновочного решения при конструировании технических систем», (далее - сокращенное название программы «ОцКом»), реализующее алгоритм оценки и выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования для объектов использования атомной энергии [117, 118].

Разработанное программное обеспечение можно отнести к системам поддержки принятия решений, концептуальная модель структуры программного обеспечения приведена на рисунке 15.

Программа реализована в среде Visual Studio 2015, язык программирования C++ [119, 120].

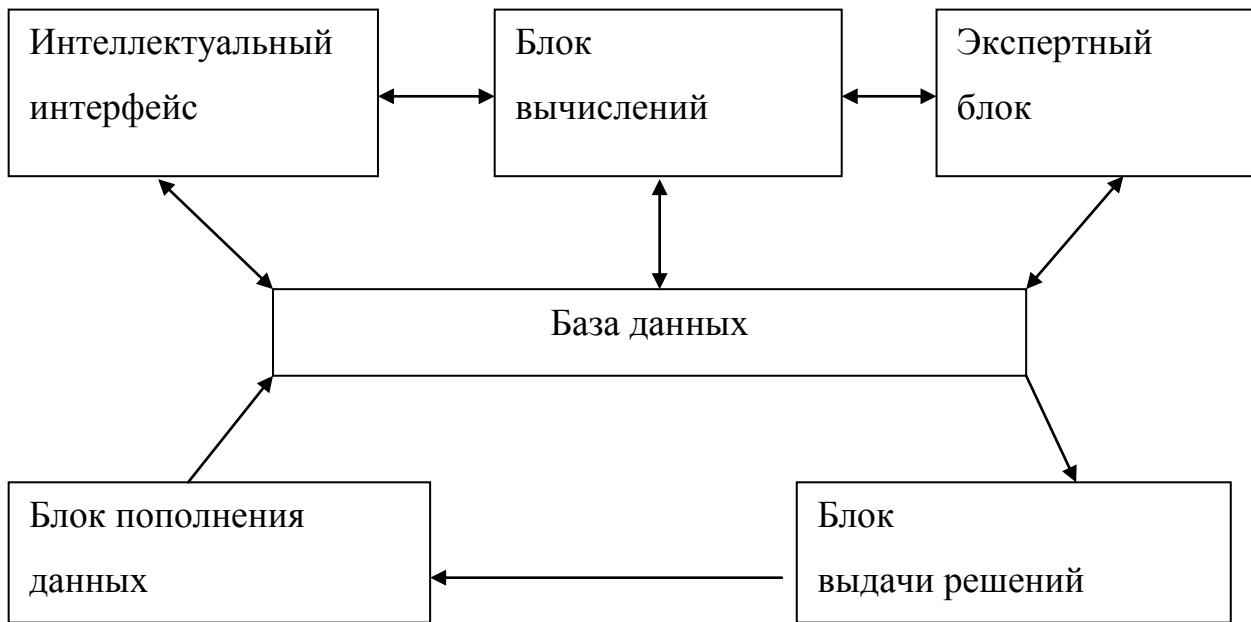


Рисунок 15 - Концептуальная модель структуры программного обеспечения

Выбор конструкции «антиреверсного устройства» и компоновочного решения насосного оборудования для АЭС проводился с помощью предлагаемого программного обеспечения.

Листинг программного обеспечения приведен в Приложении А.

На программное обеспечение получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [121], Приложение Б.

Экранная форма интерфейса программного обеспечения приведена на рисунке 16.

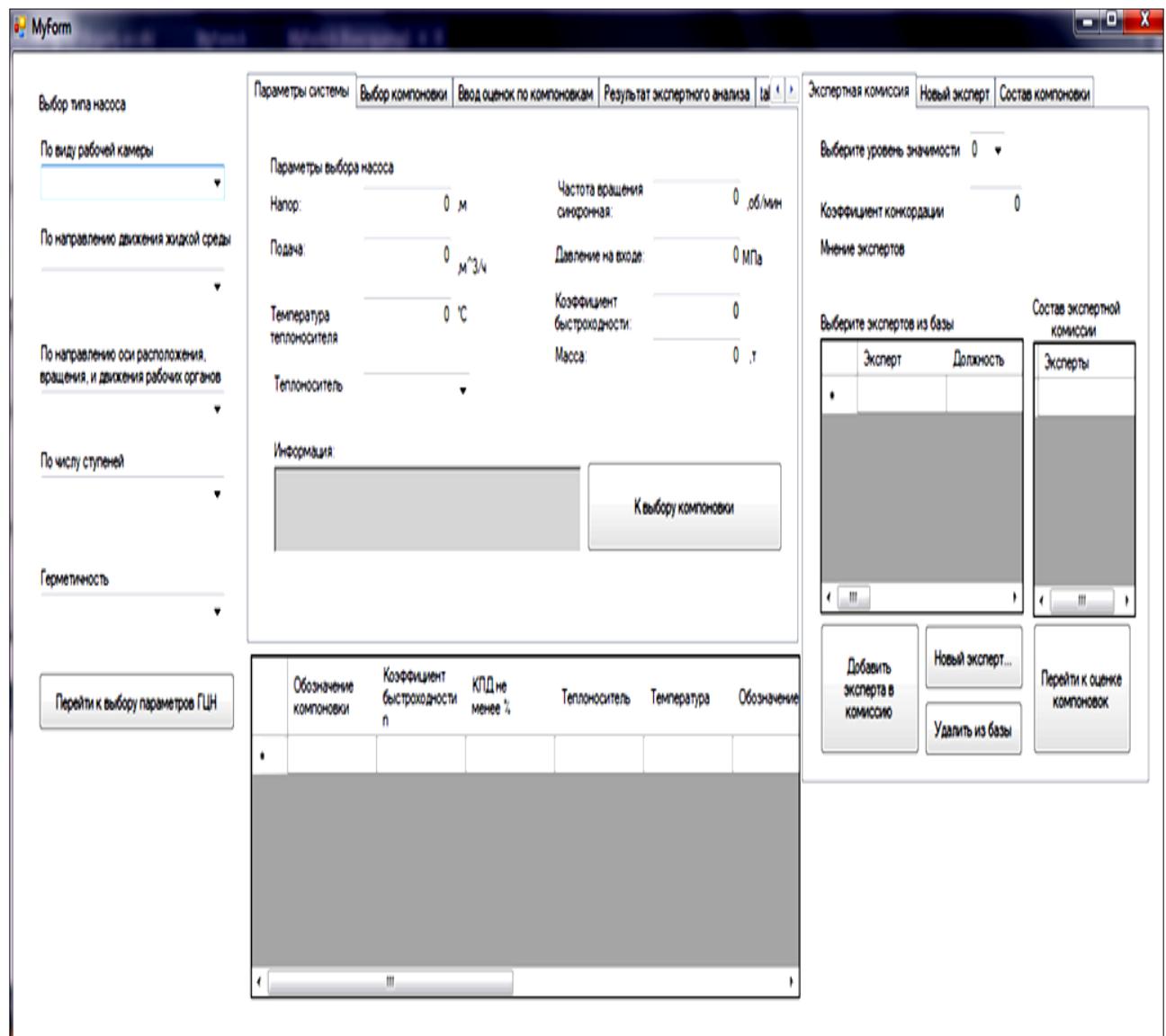


Рисунок 16 – Экранная форма интерфейса программы «ОцКом»

На данной экранной форме программы производится выбор типа насоса, и задаются параметры насоса для подбора соответствующей компоновки из базы проектов. Оператор (конструктор-разработчик проекта) заполняет вкладку «Параметры системы».

В результате работы программы подбираются соответствующие компоновки из базы проектов (рисунок 17).

Если подходящих компоновок более одной, проводится их экспертный анализ с целью выбора оптимальной компоновки. Данные опроса экспертов в программу заносит секретарь комиссии – сотрудник отдела качества.

Вариант компоновки	Обозначение компоновки	Коэффициент быстротходности n	КПД не менее %	Теплоноситель	Температура	Давление на входе, МПа	Обозначение электродвигателя	Обозначение выемной части	Обозначение опорного устройства	Обозначение гидравлической части
1	1714	От 300 до 329	76	вода борированная	298	16	ДАВДЗ-7100/280...	1714-01-0001	1391-02-0003	1714-00-0100
2	1716	От 300 до 329	76	вода борированная	298	16	ДВДАЗ 173/119-6...	1714-01-0001	1391-02-0003	1716-00-0100
3	1716-01	От 300 до 329	76	вода борированная	298	16	ДАВДЗ-7100/280...	1714-01-0001	1391-02-0003	1716-00-0100
4	1716-02	От 300 до 329	76	вода борированная	298	16	173/119-6-8-2 АМО5	1714-01-0001	1391-02-0003	1716-00-0100

Рисунок 17 - Результаты подбора подходящих компоновок из базы проектов

В программе производится расчет согласованности или несогласованности мнений экспертов при выбранном уровне значимости, есть возможность изменения состава экспертной комиссии (рисунок 18).

Добавление нового эксперта	
ФИО	Иванов В.А.
Должность	Главный конструктор по направлению
Доступность осмотра при эксплуатации	1
Безопасность обслуживающего персонала	1
Потребность в высококвалифицированном персонале для контроля и обслуживания	3
Возможность отсоединения маховика от ротора	4
Взаимозаменяемость деталей	5
Защита от пробуксовывания маховика	6
Защита от нагрева	8
Ранг может принимать значение от 1 до 7	
Добавить в базу	

Выберите уровень значимости													
0,952381													
Коэффициент конкордации													
Мнение экспертов согласовано													
Выберите экспертов из базы													
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Эксперт</th> <th>Должность</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Марков А.В.</td> <td>Главный тех</td> </tr> <tr> <td>Виноградова Г.С.</td> <td>Руководител</td> </tr> <tr> <td>▶ Денисенко А.И.</td> <td>Руководител</td> </tr> <tr> <td>Хлебников А.А.</td> <td>Руководител</td> </tr> <tr> <td>Иванов В.А.</td> <td>Главный кон</td> </tr> </tbody> </table>		Эксперт	Должность	Марков А.В.	Главный тех	Виноградова Г.С.	Руководител	▶ Денисенко А.И.	Руководител	Хлебников А.А.	Руководител	Иванов В.А.	Главный кон
Эксперт	Должность												
Марков А.В.	Главный тех												
Виноградова Г.С.	Руководител												
▶ Денисенко А.И.	Руководител												
Хлебников А.А.	Руководител												
Иванов В.А.	Главный кон												
Состав экспертной комиссии													
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Эксперты</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Денисенко А.И.</td> </tr> <tr> <td>Виноградова Г.С.</td> </tr> <tr> <td>Марков А.В.</td> </tr> <tr> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> </tr> </tbody> </table>		Эксперты	Денисенко А.И.	Виноградова Г.С.	Марков А.В.								
Эксперты													
Денисенко А.И.													
Виноградова Г.С.													
Марков А.В.													
<table border="1"> <tr> <td>Добавить эксперта в комиссию</td> <td>Новый эксперт...</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Удалить из базы</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Перейти к оценке компоновок</td> </tr> </table>		Добавить эксперта в комиссию	Новый эксперт...	Удалить из базы		Перейти к оценке компоновок							
Добавить эксперта в комиссию	Новый эксперт...												
Удалить из базы													
Перейти к оценке компоновок													

Рисунок 18 - Расстановка ранговых оценок и расчет согласованности мнений экспертов, при выполнении тестового задания; уровень значимости 0,05

Оценка согласованности мнений экспертов была проведена на тестовом задании - оценка конструкции «антиреверсное устройство».

Описание тестового задания

Проводится оценка конструкций «антиреверсное устройство», эскизы конструкций приведены на рисунках 19-21.

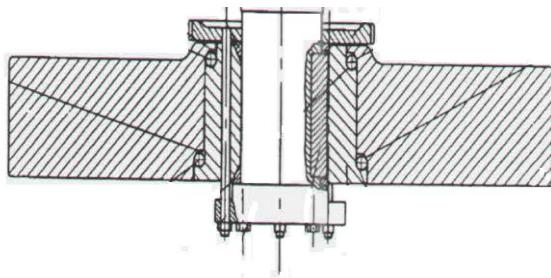


Рисунок 19. Конструкция с коническими канавками

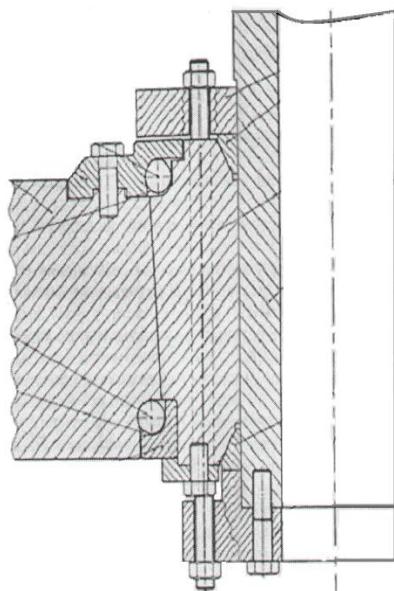


Рисунок 20. Конструкция с конусовидной втулкой

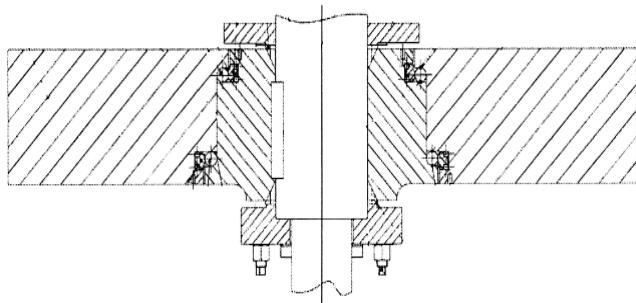


Рисунок 21. Конструкция с сепаратором

Анализ проводится по семи показателям качества.

Оценка проводится по бальной шкале со следующими значениями:

- 4 — конструкция превышает заданные требования; оценка — хорошо;
- 2 — конструкция соответствует заданным требованиям, оценка — удовлетворительно; 0 — конструкция не соответствует заданным требованиям, оценка — отрицательно. Примеры опросных листов двух экспертов приведены в таблицах 13 и 14.

Состав экспертной комиссии: эксперт № 1 — конструктор-разработчик; эксперт №2 — начальник конструкторского отдела; эксперт №3 — главный технолог; эксперт № 4 - начальник расчетной лаборатории; эксперт № 5 — главный конструктор по направлению. Председатель комиссии — технический директор; секретарь комиссии — сотрудник отдела качества.

Таблица 13 - Оценки эксперта №1

<i>Эксперт №1 Конструктор-разработчик</i>			
<i>Показатели качества оцениваемой продукции</i>	<i>Номер оцениваемой конструкции</i>		
	<i>№1</i>	<i>№2</i>	<i>№3</i>
1. Доступность осмотра при эксплуатации	2	2	2
2. Безопасность обслуживающего персонала	4	4	4
3. Потребность в высококвалифицированном персонале для контроля и обслуживания	2	2	2
4. Возможность отсоединения маховика от ротора	2	2	4
5. Взаимозаменяемость деталей	4	4	4
6. Защита от пробуксовывания маховика	2	0	2
7. Защита от нагрева	2	0	2

Весовые коэффициенты показателей качества для трех оцениваемых конструкторских решений рассчитанные по выражениям (20-23) приведены в таблице 15

Таблица 14 - Оценки эксперта №2

<i>Эксперт №2 Начальник конструкторского отдела</i>			
<i>Показатели качества оцениваемой продукции</i>	<i>Номер оцениваемой конструкции</i>		
	<i>№1</i>	<i>№2</i>	<i>№3</i>
1. Доступность осмотра при эксплуатации	2	2	0
2. Безопасность обслуживающего персонала	4	2	4
3. Потребность в высококвалифицированном персонале для контроля и обслуживания	2	0	2
4. Возможность отсоединения маховика от ротора	2	4	4
5. Взаимозаменяемость деталей	4	2	4
6. Защита от пробуксовывания маховика	0	2	2
7. Защита от нагрева	2	0	2

Таблица 15 - Весовые коэффициенты оценки конструкции
«антиреверсное устройство»

<i>Показатель качества</i>	<i>Весовой коэффициент</i>
Безопасность обслуживающего персонала	0,255
Защита от нагрева	0,255
Защита от пробуксовывания маховика	0,234
Возможность отсоединения маховика от ротора	0,149
Потребность в высококвалифицированном персонале для контроля и обслуживания	0,075
Доступность осмотра при эксплуатации	0,021
Взаимозаменяемость деталей	0,011

Оценки комплексного показателя качества для каждой оцениваемой конструкции с учетом коэффициентов весомости из таблицы 15 представлены в таблицах 16 и 17.

Таблица 16 - Оценки эксперта №1 с учетом весовых коэффициентов

<i>Эксперт №1 Конструктор-разработчик</i>			
<i>Показатели качества оцениваемой продукции</i>	<i>Номер оцениваемой конструкции</i>		
	<i>№1</i>	<i>№2</i>	<i>№3</i>
1. Доступность осмотра при эксплуатации	0,043	0,043	0,043
2. Безопасность обслуживающего персонала	1,020	1,020	1,020
3. Потребность в высококвалифицированном персонале для контроля и обслуживания	0,149	0,149	0,149
4. Возможность отсоединения маховика от ротора	0,298	0,298	0,596
5. Взаимозаменяемость деталей	0,042	0,042	0,042
6. Защита от пробуксовывания маховика	0,468	0,000	0,468
7. Защита от нагрева	0,510	0,000	0,510
Сумма баллов	2,530	1,550	2,830
Ряд предпочтительности для 1-го эксперта	2	3	1

Таблица 17 - Оценки эксперта №2 с учетом весовых коэффициентов

<i>Эксперт №2 Начальник конструкторского отдела</i>			
<i>Показатели качества оцениваемой продукции</i>	<i>Номер оцениваемой конструкции</i>		
	<i>№1</i>	<i>№2</i>	<i>№3</i>
1. Доступность осмотра при эксплуатации	0,043	0,043	0,000
2. Безопасность обслуживающего персонала	1,020	0,510	1,020
3. Потребность в высококвалифицированном персонале для контроля и обслуживания	0,149	0,000	0,149
4. Возможность отсоединения маховика от ротора	0,298	0,596	0,596
5. Взаимозаменяемость деталей	0,042	0,0212	0,042
6. Защита от пробуксовывания маховика	0,000	0,468	0,468
7. Защита от нагрева	0,510	0,000	0,510
Сумма баллов	2,060	1,64	2,790
Ряд предпочтительности для 2-го эксперта	2	3	1

Результат расчета суммарного определяющего показателя качества выражения (28,29) приведен в таблице 18.

Таблица 18 - Результаты расчета определяющего показателя качества

<i>Суммарный определяющий показатель качества для каждой из оцениваемых конструкций</i>	2,07	1,75	2,41
<i>Ряд предпочтительности экспертов</i>	2	3	1

Из таблицы 18 (строка 2) можно сделать вывод, что для дальнейшей проработки конструкции насосного оборудования для АЭС рекомендуется конструкция антиреверсного устройства № 3.

Проверим согласованность мнений экспертов расчетом коэффициента Кенделла (конкордации) W выражение (24,27). Результаты расчета приведены в таблице 19.

Таблица 19 - Результаты расчета коэффициента Кенделла (W)

<i>Значение коэффициента конкордации W</i>	0,95
<i>Оценка значимости коэффициента конкордации по критерию Пирсона (расчетное) χ_P^2</i>	23,35
<i>Значение критерия Пирсона χ_T^2 для числа степеней свободы</i>	12,59
<i>$K = n-1 = 7-1 = 6$ и при заданном уровне значимости $\alpha = 0,05$</i>	

Так как X_p^2 расчетный $23.35 > X_T^2$ табличного (12,59), то $W = 0,95$ - величина не случайная, можно сделать вывод, что мнения экспертов согласованы и следовательно рассчитанная оценка конструкции объективна.

Оценка компоновочных решений, в том числе и тестового задания, производится каждым экспертом по специально разработанному опросному листу. Фрагмент опросного листа выбора компоновочного решения насосного оборудования приведен в таблице 20.

Таблица 20 – Фрагмент опросного листа оценки компоновочного решения насосного оборудования для АЭС.

Интерфейс простановки оценок тестового задания в программе «ОцКом» приведен на рисунке 22.

Параметры системы	Выбор компоновки	Ввод оценок по компоновкам	Результат экспертного анализа	Экспертный анализ
Введите оценки экспертов для каждой компоновки				
			Первый эксперт	
Эксперт	Марков А.В.	Варианты компоновок	Второй эксперт	
Должность	Главный технолог	Nº1 Nº2 Nº3 Nº4	>>> Третий эксперт	
Доступность осмотра при эксплуатации		4 ▾ 2 ▾ 2 ▾ 0 ▾		
Безопасность обслуживающего персонала		2 ▾ 0 ▾ 4 ▾ 2 ▾		
Потребность в высококвалифицированном персонале для контроля и обслуживания		4 ▾ 0 ▾ 2 ▾ 4 ▾		
Возможность отсоединения маховика от ротора		2 ▾ 2 ▾ 4 ▾ 0 ▾		
Взаимозаменяемость деталей		2 ▾ 2 ▾ 4 ▾ 4 ▾		
Защита от пробуксовывания маховика		0 ▾ 4 ▾ 2 ▾ 2 ▾		
Защита от нагрева		2 ▾ 2 ▾ 4 ▾ 2 ▾	К результатам экспертного анализа	

Рисунок 22 - Опросный лист экспертных оценок тестового задания

При нажатии кнопки «К результатам экспертного анализа» программа производит расчет определяющего показателя качества и критерия Сэвиджа. Даётся рекомендация об утверждении компоновки с максимальным значением определяющего показателя и минимальным значением критерия Сэвиджа. Результат оценки выбора компоновочного решения насосного оборудования для АЭС приведен на рисунке 23.

Параметры системы	Выбор компоновки	Ввод оценок по компоновкам	Результат экспертного анализа	Экспертный анализ																																																	
<p>Результаты экспертного анализа.</p> <p>Суммарная оценка экспертов по компоновкам:</p> <table border="1"> <tr> <td>Компоновка №1</td> <td>61,28964</td> <td>По результатам максимального значения определяющего показателя, к утверждению рекомендована</td> </tr> <tr> <td>Компоновка №2</td> <td>61,71088</td> <td>Компоновка</td> </tr> <tr> <td>Компоновка №3</td> <td>49,22516</td> <td>С параметрами:</td> </tr> <tr> <td>Компоновка №4</td> <td>35,21254</td> <td>Обозначение компоновки</td> <td>1716</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Коэф. быстроходности</td> <td>От 300 до 329</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>КПД не менее</td> <td>76</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Теплоноситель</td> <td>вода борированная</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Температура</td> <td>298</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Двигатель</td> <td>ДАВД3173/119-6-8-2 АМО5 Т3</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Выемная часть</td> <td>1714-01-0001</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Устройство опорное</td> <td>1391-02-0003</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Гидравлическая часть</td> <td>1716-00-0100</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>критерий Свиджка</td> <td>0,031</td> </tr> </table>					Компоновка №1	61,28964	По результатам максимального значения определяющего показателя, к утверждению рекомендована	Компоновка №2	61,71088	Компоновка	Компоновка №3	49,22516	С параметрами:	Компоновка №4	35,21254	Обозначение компоновки	1716			Коэф. быстроходности	От 300 до 329			КПД не менее	76			Теплоноситель	вода борированная			Температура	298			Двигатель	ДАВД3173/119-6-8-2 АМО5 Т3			Выемная часть	1714-01-0001			Устройство опорное	1391-02-0003			Гидравлическая часть	1716-00-0100			критерий Свиджка	0,031
Компоновка №1	61,28964	По результатам максимального значения определяющего показателя, к утверждению рекомендована																																																			
Компоновка №2	61,71088	Компоновка																																																			
Компоновка №3	49,22516	С параметрами:																																																			
Компоновка №4	35,21254	Обозначение компоновки	1716																																																		
		Коэф. быстроходности	От 300 до 329																																																		
		КПД не менее	76																																																		
		Теплоноситель	вода борированная																																																		
		Температура	298																																																		
		Двигатель	ДАВД3173/119-6-8-2 АМО5 Т3																																																		
		Выемная часть	1714-01-0001																																																		
		Устройство опорное	1391-02-0003																																																		
		Гидравлическая часть	1716-00-0100																																																		
		критерий Свиджка	0,031																																																		
Вариант компоновки	Обозначение компоновки	Коэффициент быстроходности п	КПД не менее %	Теплоноситель	Температура	Давление на входе, МПа	Обозначение электродвигателя	Обозначение выемной части	Обозначение опорного устройства	Обозначение гидравлической части																																											
1	1714	От 300 до 329	76	вода борирован...	298	16	ДАВД3-7100/280...	1714-01-0001	1391-02-0003	1714-00-0100																																											
2	1716	От 300 до 329	76	вода борирован...	298	16	ДВДА3 173/119-6...	1714-01-0001	1391-02-0003	1716-00-0100																																											
3	1716-01	От 300 до 329	76	вода борирован...	298	16	ДАВД3-7100/280...	1714-01-0001	1391-02-0003	1716-00-0100																																											
4	1716-02	От 300 до 329	76	вода борирован...	298	16	173/119-6-8-2 АМО5	1714-01-0001	1391-02-0003	1716-00-0100																																											

Рисунок 23 - Результат экспертного анализа выбора компоновочного решения насосного оборудования

Полученные практические результаты были учтены при выборе конструкции «антиреверсного устройства» для АЭС «Куданкулам» и компоновочного решения насосного оборудования для «Белорусской АЭС», что подтверждено Актом о внедрении, Приложение В.

3.3 Выводы к главе 3

В результате реализации алгоритма выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования в программном обеспечении достигнуты практические результаты и сделаны следующие выводы:

- разработан алгоритм работы программного обеспечения, позволивший автоматизировать процесс выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования АЭС;
- проведена апробация алгоритмов и работы программного обеспечения при выборе конструкции «антиреверсного устройства» для проекта АЭС «Куданкулам» и компоновочного решения насосного оборудования для проекта «Белорусской АЭС», которая доказала эффективность применения предложенных алгоритмов и программного обеспечения;
- получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 207615035.

ГЛАВА 4 АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО КОМПОНОВОЧНОГО РЕШЕНИЯ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

4.1 Результаты аprobации

4.1.1 Результаты выбора оптимального компоновочного решения при наличии нескольких компоновочных решений из базы проектов.

Исходные технические требования (выписка из технической спецификации)

Проект предусматривает два энергоблока, каждый мощностью 1200 МВт.

Планируется, что после завершения строительства АЭС будет вырабатывать около 35 млрд кВт·ч в год. Тип реакторной установки: проект АЭС-2006

Основные характеристики проекта:

- номинальная тепловая мощность реактора — 3200 МВт;
- электрическая мощность — 1200 МВт;
- число циркуляционных петель — 4;
- температура теплоносителя — 300°C;
- теплоноситель — вода борированная.

Основные характеристики насосного оборудования:

- подача номинальная, м³/ч — 22600;
- напор при номинальной подаче, м — 87,5_{-3,5}^{+3,5};
- давление всасывания, МПа — 16^{+0,2};
- кавитационный запас, при температуре теплоносителя 300°C — 9,6 МПа;
- КПД, не менее, % — 76;
- частота вращения (синхронная) приводного двигателя, об/мин — 1000;
- организационная протечка воды, м³/ч, не более — 1,2;
- масса насосного агрегата, не более, т — 150;
- проектный (назначенной) срок службы основного оборудования — 60 лет;
- средняя наработка на отказ — не менее 18000 ч;
- средний ресурс между средними ремонтами — не менее 25200 ч;

- коэффициент готовности — не ниже 0,95;
- средний срок сохраняемости — не менее трех лет в упаковке предприятия изготавителя.

Из базы проектов насосного оборудования с применением программного обеспечения «ОцКом», подобраны проекты 1714, 1716, 1716-01 и 1716-02.

Технические данные проекта 1714

Основные технические характеристики приведены в таблице 21.

Таблица 21 - Основные технические характеристики проекта 1714

Подача номинальная, м ³ /ч	22600
Напор (при номинальной подаче), м	87,5±3,5
Коэффициент быстроходности	300 ÷ 329
Рабочая температура теплоносителя, °С	298 ⁺²
Рабочее давление на входе, МПа	16 ^{+0,2}
Мощность агрегата, кВт	5250
Номинальное напряжение питающего тока, В	10000
Частота вращения (синхронная), об/мин	1000
Кавитационный запас, при температуре теплоносителя 300°C, МПа	9,6
КПД, не менее %	76
Масса (масса электродвигателя), т	140 (41,7)
Высота, мм	10300
Срок службы, не менее, лет	60
Средняя наработка на отказ, не менее, ч	18000
Средний ресурс между средними ремонтами, не менее, ч	25200
Коэффициент готовности, не ниже	0,99
Теплоноситель	вода борированная
Организационная протечка воды, не более, м ³ /ч	1,2
Применяемый электродвигатель	ДАВДЗ-7100/2800-10000-6/8 АМО5 ТУ 3381-026-59162910-2009
Выемная часть	1714-01-0001
Устройство опорное	1391-02-0003
Гидравлическая часть	1714-00-0100

Компоновочная схема проекта 1714 приведена на рисунке 24.

Проект 1714 представляет собой вертикальный центробежный насосный агрегат, с расположением вспомогательных систем на двух стенах бокса.

Основные узлы проекта 1714:

- 1 – холодильник автономного контура;
- 2 – доохлаждающий холодильник блока уплотнения;
- 3 – холодильник радиально-осевого подшипника;
- 4 – двигатель;
- 5 – маслоблок;
- 6 – электронасос;
- 7 – маслоохладитель;
- 8 – муфта торсионная;
- 9 – электромагнит;
- 10 – подшипник радиально-осевой;
- 11 – блок уплотнений;
- 12 – корпус;
- 13 – подшипник радиальный нижний;
- 14 – колесо рабочее;
- 15 – устройство опорное;
- 16 – проставка верхняя;
- 17 – преставка нижняя;
- 18 – корпус сферический;
- 19 – кольцо биологической защиты;
- 20 – площадка обслуживания;
- 21 – бак подпорный;
- 22 – поддон для сбора масловодяных дренажей.

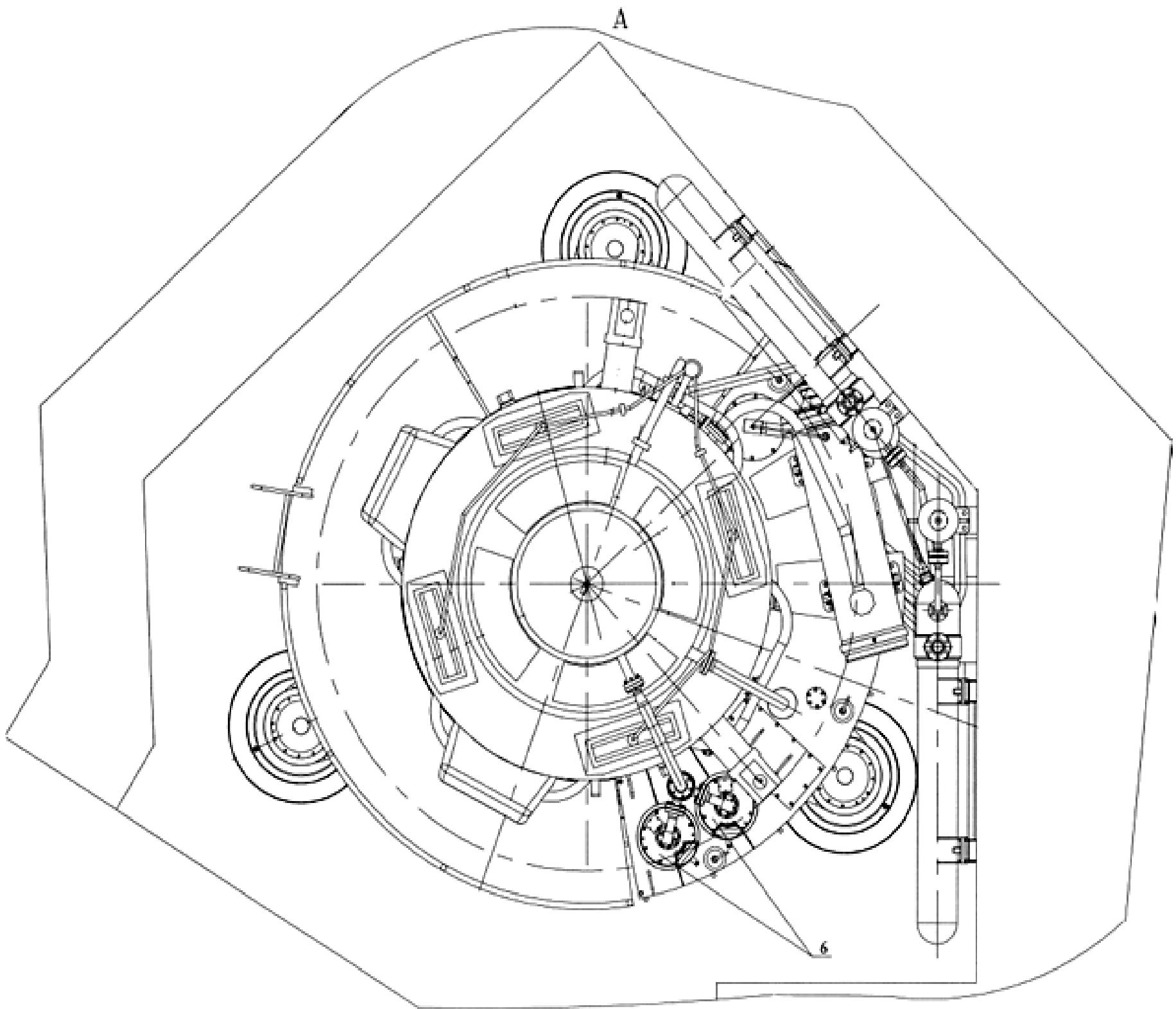
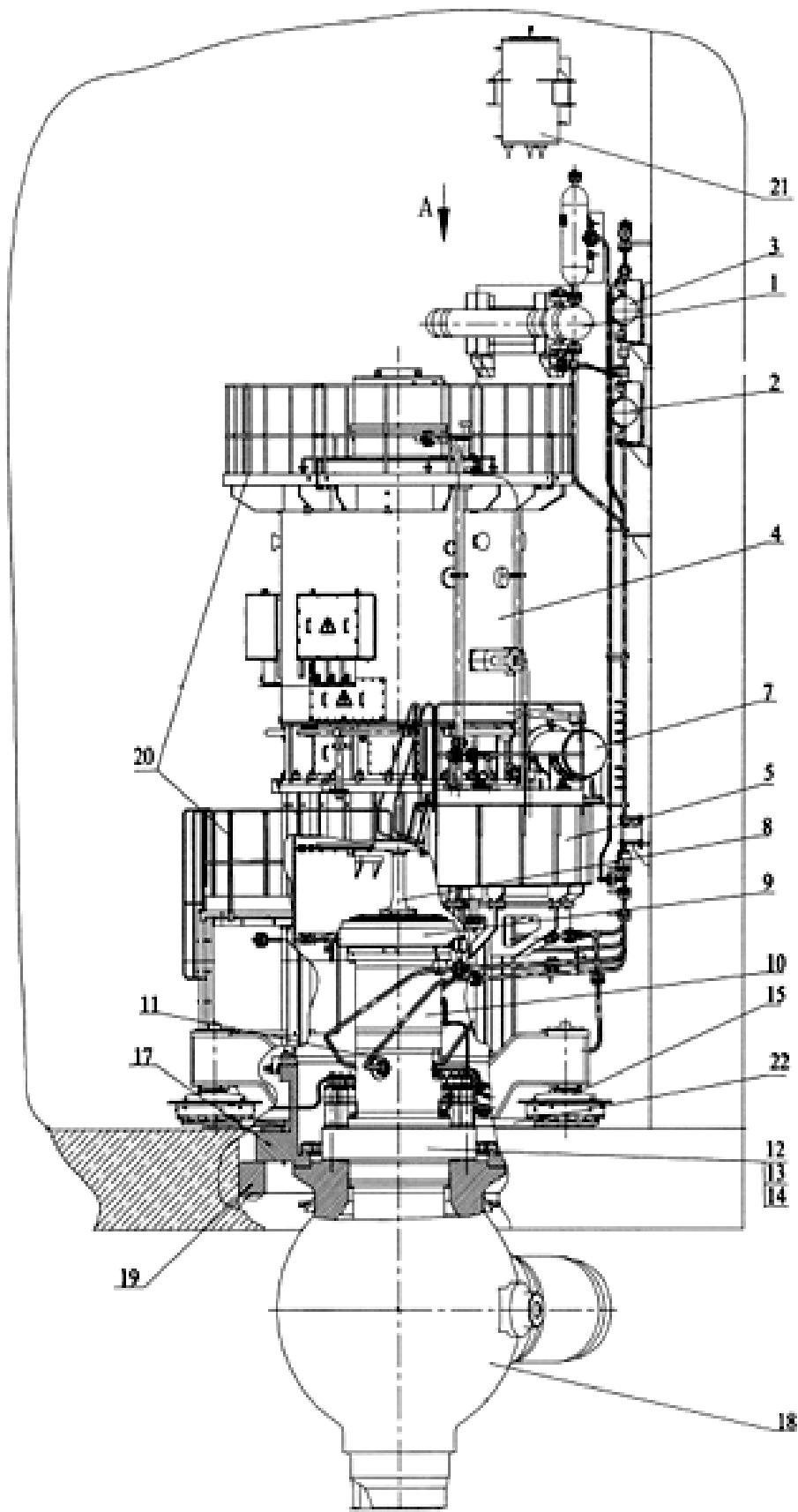


Рисунок 24 - Компоновочная схема проекта 1714

Технические данные проекта 1716

Основные технические характеристики приведены в таблице 22.

Таблица 22 - Основные технические характеристики проекта 1716

Подача номинальная, м ³ /ч	22600
Напор (при номинальной подаче), м	87,5 ^{+3,5}
Коэффициент быстроходности	300 ÷ 329
Рабочая температура теплоносителя, °С	298 ⁺²
Рабочее давление на входе, МПа	16 ^{+0,2}
Мощность агрегата, кВт	5250
Номинальное напряжение питающего тока, В	10000
Частота вращения (синхронная), об/мин	1000
Кавитационный запас, при температуре теплоносителя 300°C, МПа	9,6
КПД, не менее %	76
Масса (масса электродвигателя), т	140 (41,7)
Высота, мм	10300
Срок службы, не менее, лет	60
Средняя наработка на отказ, не менее, ч	18000
Средний ресурс между средними ремонтами, не менее, ч	25200
Коэффициент готовности, не ниже	0,99
Теплоноситель	вода борированная
Организационная протечка воды, не более, м ³ /ч	1,2
Применяемый электродвигатель	ДВДАЗ 173/119-6-8-2 АМО5 1 БП.046.100-01ТУ /ДАВДЗ-7100/2800-10000-6/8 АМО5 ТУ 3381-026-59162910-2009/ 173/119-6-8-2 АМО5 ОПБ.109.134 ТЗ
Выемная часть	1714-01-0001
Устройство опорное	1391-02-0003
Гидравлическая часть	1714-00-0100

Компоновочная схема проекта 1716 приведена на рисунке 25.

Проект 1716 представляет собой вертикальный центробежный насосный агрегат, с расположением вспомогательных систем на одной стене бокса.

Основные узлы проекта 1716:

- 1 – холодильник автономного контура;
- 2 – доохлаждающий холодильник блока уплотнения;
- 3 – холодильник радиально-осевого подшипника;
- 4 – двигатель;
- 5 – маслоблок;
- 6 – электронасос;
- 7 – маслоохладитель;
- 8 – муфта торсионная;
- 9 – электромагнит;
- 10 – подшипник радиально-осевой;
- 11 – блок уплотнений;
- 12 – корпус;
- 13 – подшипник радиальный нижний;
- 14 – колесо рабочее;
- 15 – устройство опорное;
- 16 – проставка верхняя;
- 17 – преставка нижняя;
- 18 – корпус сферический;
- 19 – кольцо биологической защиты;
- 20 – площадка обслуживания;
- 21 – вспомогательный циркуляционный электронасос.

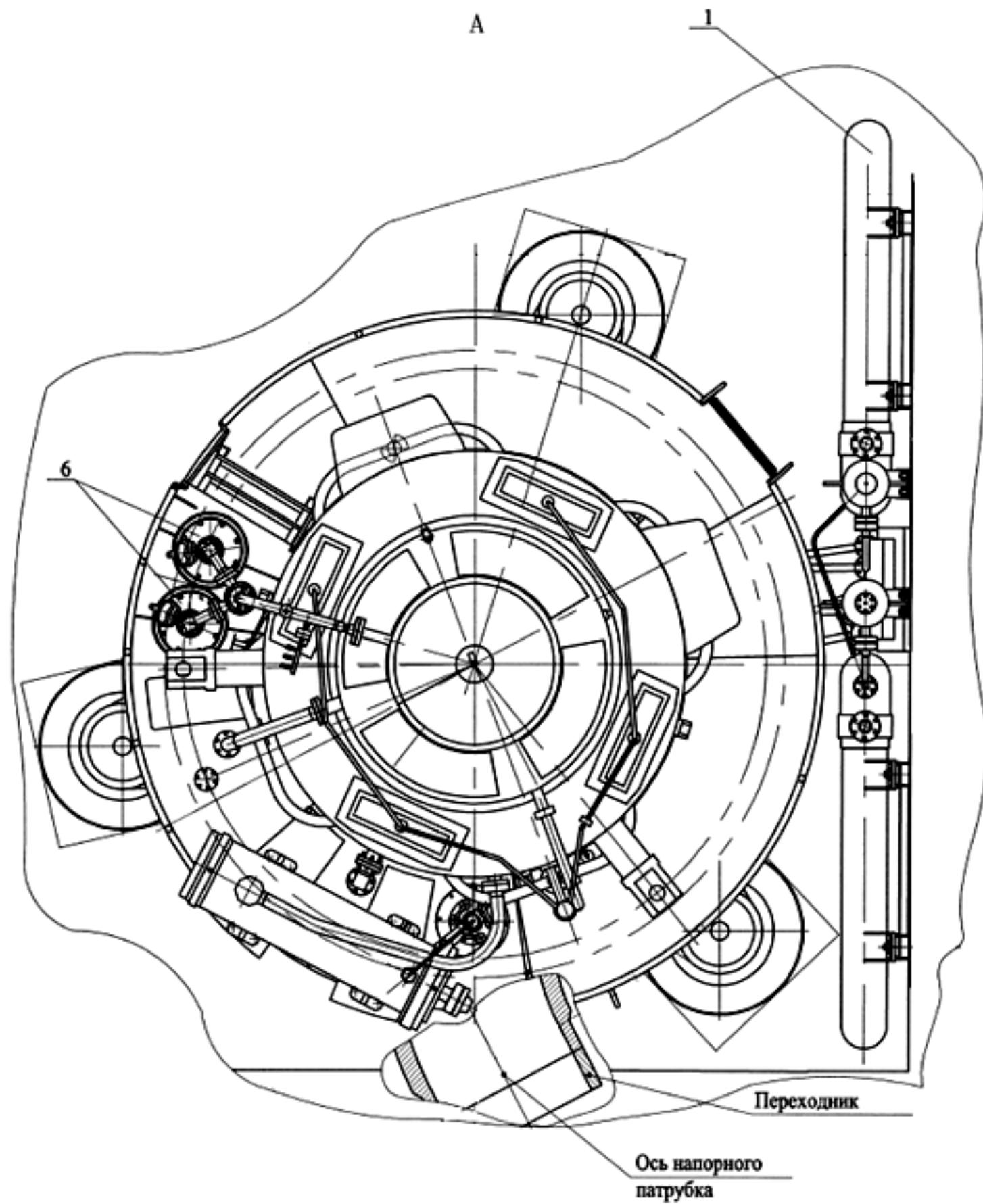
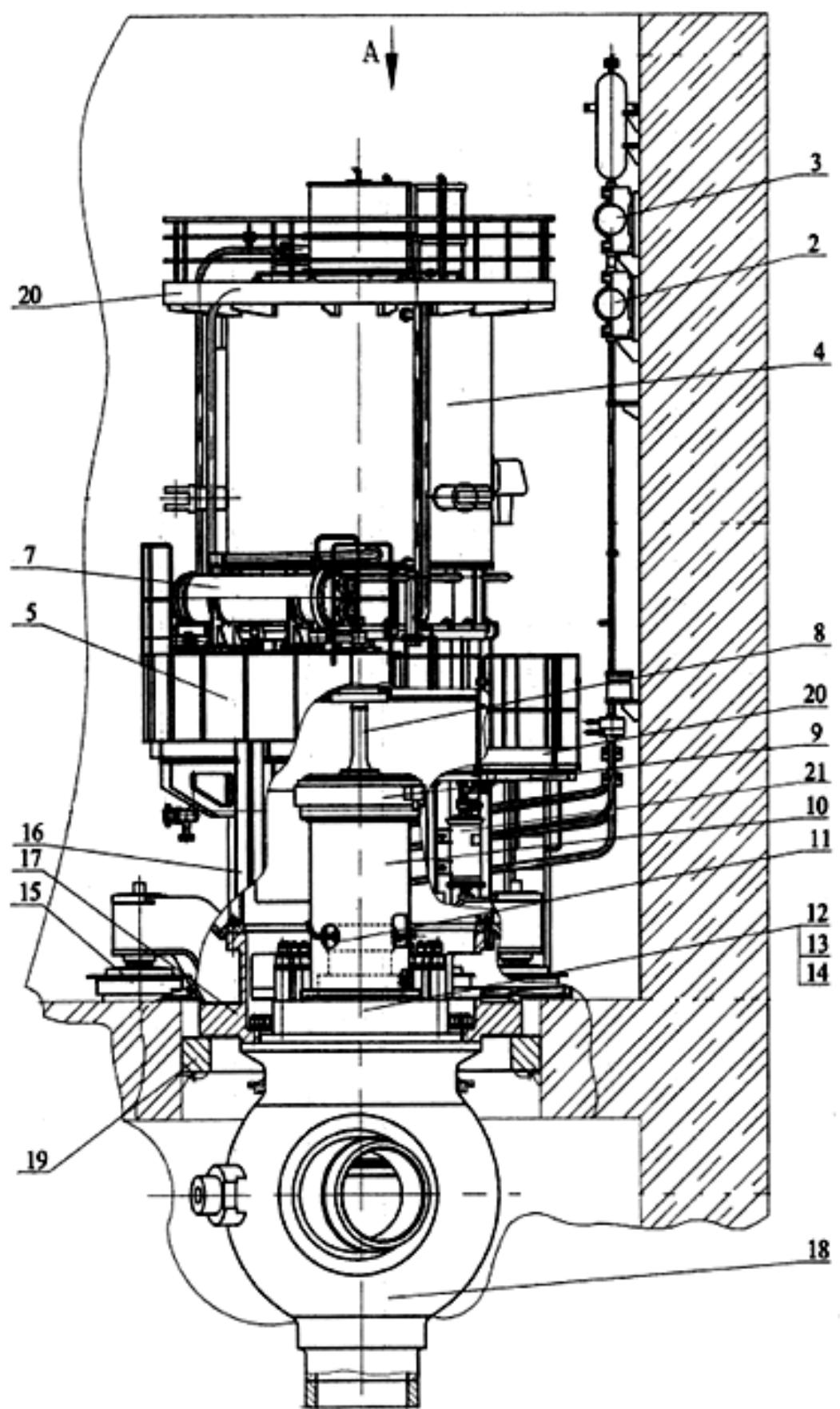


Рисунок 25 - Компоновочная схема проекта 1716

Технические данные проекта 1716-01

Основные технические характеристики приведены в таблице 23.

Таблица 23 - Основные технические характеристики проекта 1716-01

Подача номинальная, м ³ /ч	22600
Напор (при номинальной подаче), м	87,5±3,5
Коэффициент быстроходности	300 ÷ 329
Рабочая температура теплоносителя, °C	298 ⁺²
Рабочее давление на входе, МПа	16 ^{+0,2}
Мощность агрегата, кВт	5250
Номинальное напряжение питающего тока, В	6000
Частота вращения (синхронная), об/мин	1000
Кавитационный запас, при температуре теплоносителя 300°C, МПа	9,6
КПД, не менее %	75
Масса (масса электродвигателя), т	140 (41,7)
Высота, мм	10300
Срок службы, не менее, лет	40
Средняя наработка на отказ, не менее, ч	18000
Средний ресурс между средними ремонтами, не менее, ч	24000
Коэффициент готовности, не ниже	0,95
Теплоноситель	вода борированная
Организационная протечка воды, не более, м ³ /ч	1,2
Применяемый электродвигатель	ДВДАЗ 173/119-6-8-2
Выемная часть	AMO5 1 БП.046.100-01ТУ
Устройство опорное	1391-01-0002-01
Гидравлическая часть	1391-02-0003-01
	1391-00-0100-01

Компоновочная схема проекта 1716-01 приведена на рисунке 26.

Проект 1716 представляет собой вертикальный центробежный насосный агрегат, с расположением вспомогательных систем на одной стене бокса.

Основные узлы:

- 1 – холодильник автономного контура;
- 2 – доохлаждающий холодильник блока уплотнения;
- 3 – холодильник радиально-осевого подшипника;
- 4 – двигатель;
- 5 – маслоблок;
- 6 – электронасос;
- 7 – маслоохладитель;
- 8 – муфта торсионная;
- 9 – электромагнит;
- 10 – подшипник радиально-осевой;
- 11 – блок уплотнений;
- 12 – корпус;
- 13 – подшипник радиальный нижний;
- 14 – колесо рабочее;
- 15 – устройство опорное;
- 16 – проставка верхняя;
- 17 – преставка нижняя;
- 18 – корпус сферический;
- 19 – кольцо биологической защиты;
- 20 – площадка обслуживания;
- 21 – вспомогательный циркуляционный электронасос.

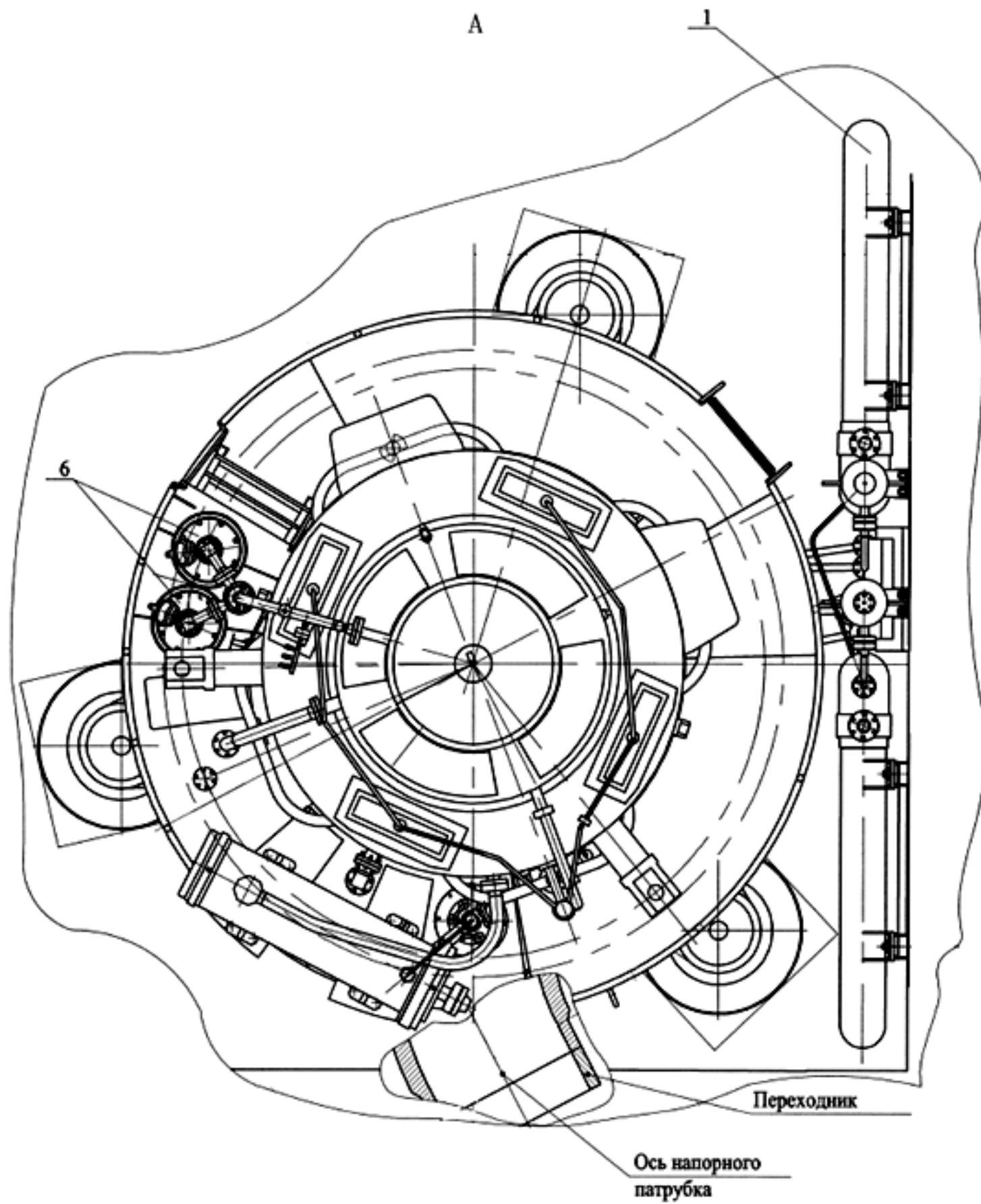
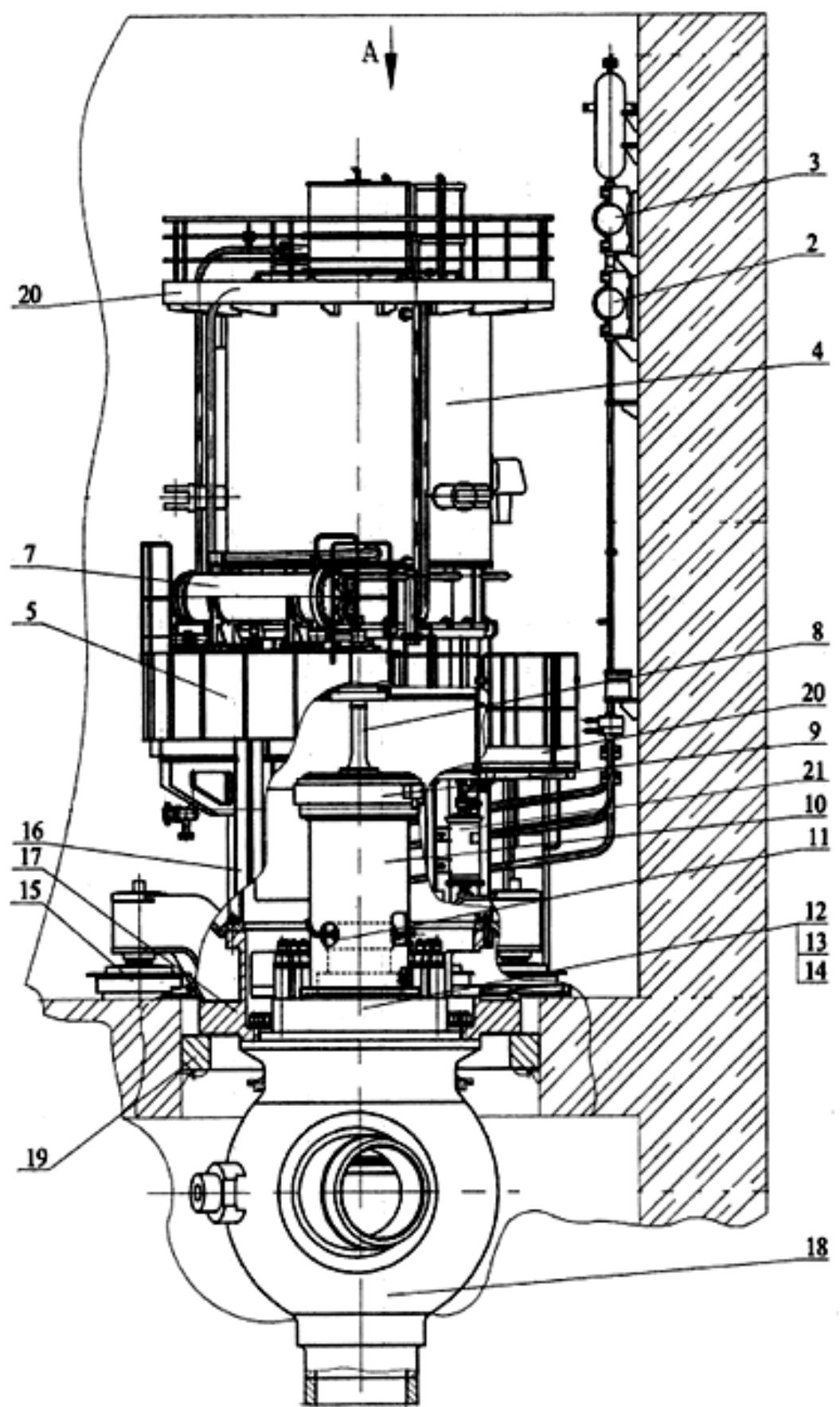


Рисунок 26 - Компоновочная схема проекта 1716-01

Технические данные проекта 1716-02

Основные технические характеристики приведены в таблице 24.

Таблица 24 - Основные технические характеристики проекта 1716-02

Подача номинальная, м ³ /ч	22600
Напор (при номинальной подаче), м	87,5 ± 3,5
Коэффициент быстроходности	300 ÷ 329
Рабочая температура теплоносителя, °С	298 ⁺²
Рабочее давление на входе, МПа	16 ^{+0,2}
Мощность агрегата, кВт	5000
Номинальное напряжение питающего тока, В	10000
Частота вращения (синхронная), об/мин	1000
Кавитационный запас, при температуре теплоносителя 300°C, МПа	9,6
КПД, не менее %	75
Масса (масса электродвигателя), т	143 (43)
Высота, мм	10300
Срок службы, не менее, лет	60
Средняя наработка на отказ, не менее, ч	18000
Средний ресурс между средними ремонтами, не менее, ч	24000
Коэффициент готовности, не ниже	0,95
Теплоноситель	вода борированная
Организационная протечка воды, не более, м ³ /ч	1,2
Применяемый электродвигатель	ДВДАЗ-173/119-6-8-2 АМО5 ИБПД.528825.002-04ТУ
Выемная часть	1391-01-0002-03
Устройство опорное	1391-02-0003-03
Гидравлическая часть	1391-00-0100-03

Компоновочная схема проекта 1716-02 приведена на рисунке 27.

Проект 1716-02 представляет собой вертикальный центробежный насосный агрегат, с расположением вспомогательных систем на двух стенах бокса.

Основные узлы проекта 1716-02:

- 1 – холодильник автономного контура;
- 2 – доохлаждающий холодильник блока уплотнения;
- 3 – холодильник радиально-осевого подшипника;
- 4 – двигатель;
- 5 – маслоблок;
- 6 – электронасос;
- 7 – маслоохладитель;
- 8 – муфта торсионная;
- 9 – часть насоса выемная;
- 10 – устройство опорное;
- 11 – проставка верхняя;
- 12 – преставка нижняя;
- 13 – корпус сферический;
- 14 – кольцо биологической защиты;
- 15 – площадки обслуживания.

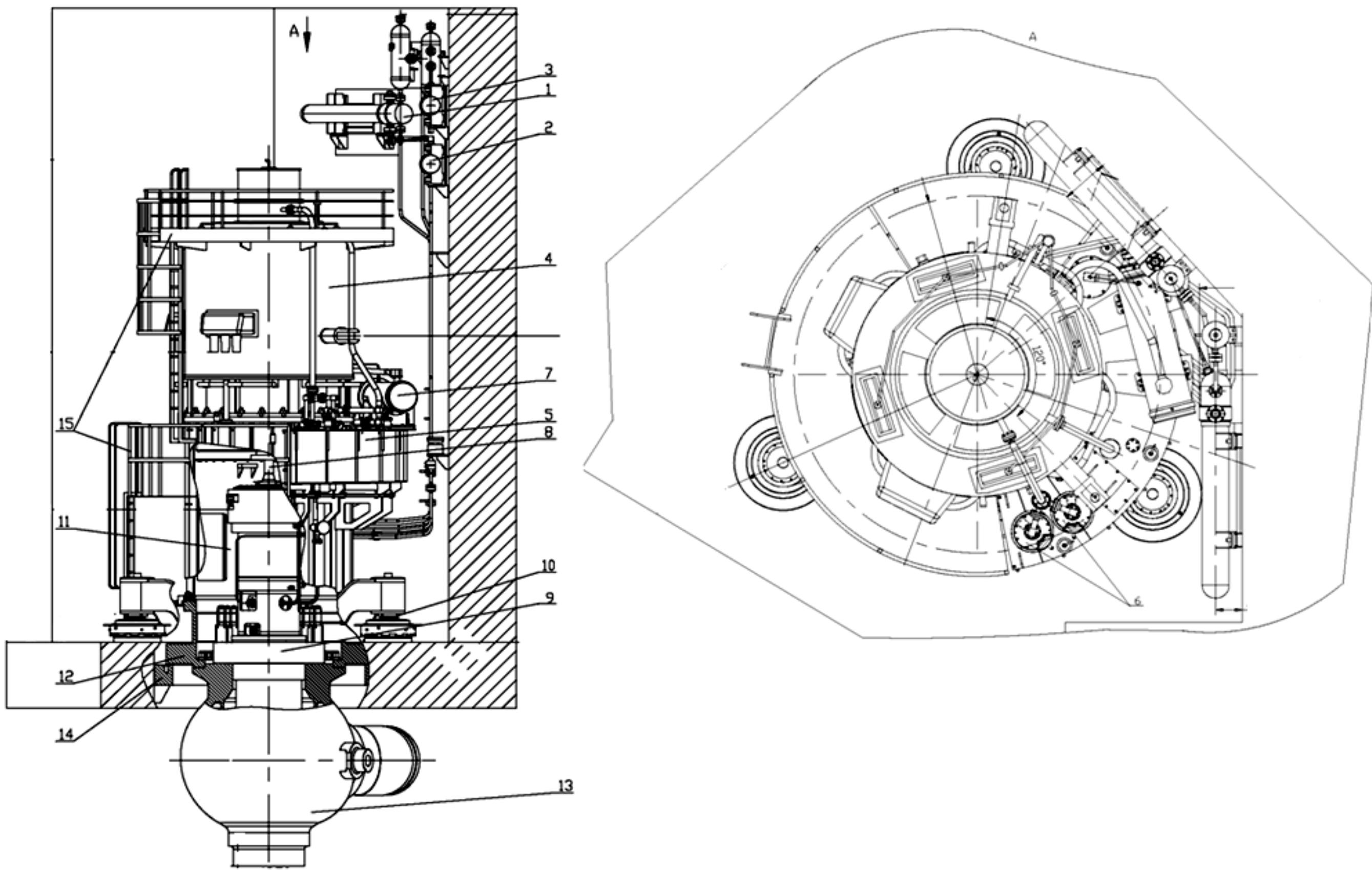


Рисунок 27 - Компоновочная схема проекта 1716-02

При сравнении проектов компоновочных решений насосного оборудования для заданного проекта АЭС были получены следующие результаты.

Распределение весовых коэффициентов групп показателей качества по результатам анкетирования экспертной комиссии приведены на рисунке 28.

Состав экспертной комиссии: конструктор-разработчик, начальник конструкторского отдела; главный технолог; начальник расчетной лаборатории; главный конструктор по насосному оборудованию, председатель комиссии - технический директор.



Рисунок 28 - Распределение весовых коэффициентов групп показателей качества

Итоговая таблица оценок компоновочных решений насосного оборудования с учетом рисков приведена в таблице 25. Графическое отображение результатов многокритериального анализа компоновочных решений приведено на рисунке 29.

Таблица 25 - Итоговая суммарная оценка компоновочных решений и величин рисков принятия решения

№ п/п	Обозначение компоновки	Суммарная оценка экспертной комиссии	Величина риска (критерий Сэвиджа)
1	1714	61,289	0,185
2	1716	61,710	0,031
3	1716-01	49,225	0,197
4	1716-02	35,212	0,197

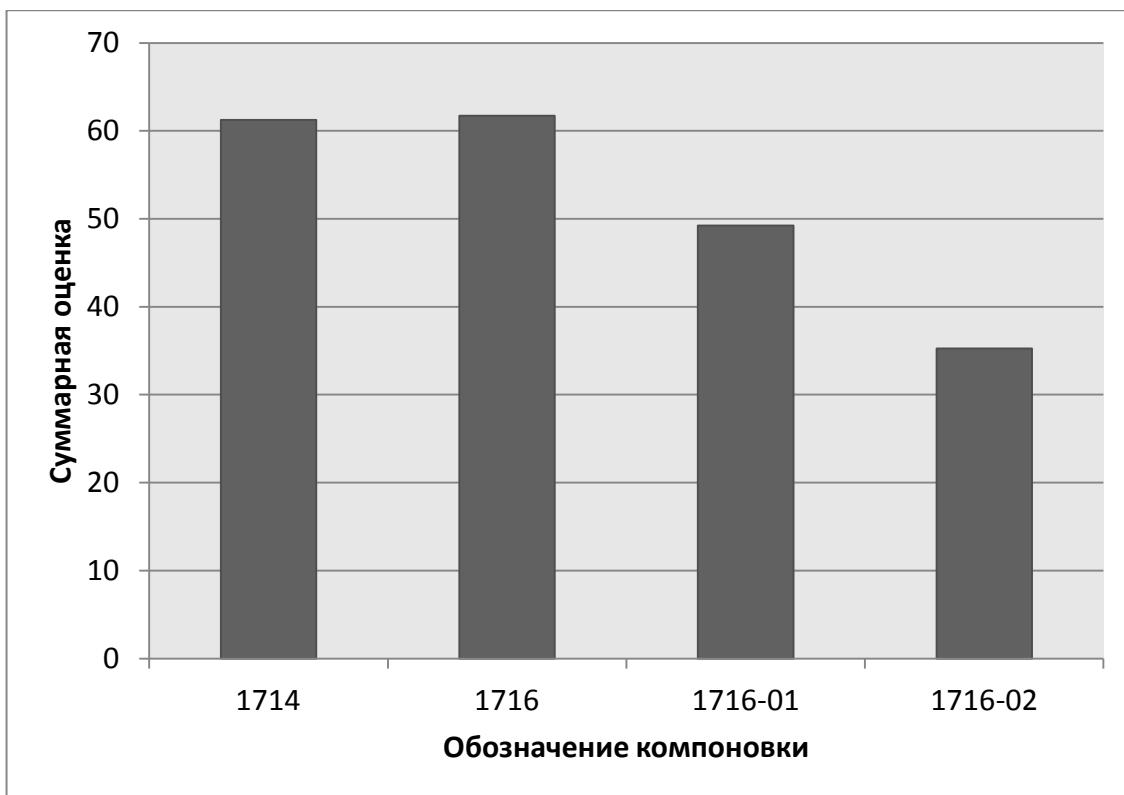


Рисунок 29 - Результаты многокритериального анализа компоновочных решений насосного оборудования для проекта АЭС.

По результатам сравнения компоновочных решений насосного оборудования для дальнейшей проработки было утверждено компоновочное решение № 2 – проект 1716, эффективность выбора данного решения оценивается минимальным значение критерия риска из числа оцениваемых решений – 0,031.

4.1.2 Результаты выбора оптимального компоновочного решения при наличии синтезированного компоновочного решения и компоновочных решений из базы проектов.

Исходные технические требования (выписка из технической спецификации)

Проект предусматривает один энергоблок, мощностью 1200 МВт.

Планируется, что после завершения строительства АЭС будет вырабатывать около 17,5 млрд кВт·ч в год.

Предполагаемые типы реакторных установок: АЭС-2006 и ВВЭР-ТОИ.

Основные характеристики проекта:

- номинальная тепловая мощность реактора — 3200 МВт;
- электрическая мощность — 1200 МВт;
- число циркуляционных петель – 4;

- температура теплоносителя – 300°C;
- теплоноситель – вода борированная.

Основные характеристики насосного оборудования:

- подача (рабочий диапазон), м³/ч — 22000 ÷ 27000;
- напор при номинальной подаче, м — 87,5+3,5;
- давление всасывания, МПа — 16^{+0,2};
- кавитационный запас, при температуре теплоносителя 300°C — 9,6 МПа;
- КПД, не менее, % — 76;
- частота вращения (синхронная) приводного двигателя, об/мин — 1000;
- организационная протечка воды, м³/ч, не более — 1,2;
- масса насосного агрегата, не более, т — 140;
- проектный (назначенный) срок службы основного оборудования — 60 лет;
- средняя наработка на отказ — не менее 18000 ч;
- средний ресурс между средними ремонтами — не менее 25200 ч;
- коэффициент готовности — не ниже 0,99;
- средний срок сохраняемости — не менее трех лет в упаковке предприятия изготовителя.

Из базы проектов насосного оборудования с применением программного обеспечения «ОцКом», подобраны проекты 1391 и 1732, и предложено новое компоновочное решение 1753.

Технические данные проекта 1391

Проект 1391 представляет собой центробежный, вертикальный, одноступенчатый насосный агрегат с блоком торцевого уплотнения вала, консольным рабочим колесом, выносным асинхронным электродвигателем с маховиком и осевым подводом воды.

Проект 1391 оснащен:

- для восприятия сейсмических нагрузок двумя поясами раскрепления;
- для ограничения аварийного перемещения при разрыве трубопровода первого контура упорами.

В состав проекта 1391 входят следующие части:

- выемная часть, основные узлы изготовлены из нержавеющей стали;
- гидравлическая часть представляет собой стальной сварно-кованный сферический корпус;
- блок торцевых уплотнений агрегата предотвращает протечки радиоактивной воды первого контура, используется материал силицированный графит;
- циркуляция первого контура обеспечивается рабочим колесом центробежного типа;
- охлаждение и смазка подшипников насоса осуществляется водой.

Агрегат устанавливается на подвижных роликовых опорах. Индивидуальная система смазки монтируется прямо на корпусе, что сводит к минимуму протяженность маслопроводов. Основные технические характеристики проекта 1391 приведены в таблице 26.

Таблица 26 – Основные технические характеристики проекта 1391

Подача номинальная, $\text{м}^3/\text{ч}$	22600
Напор (при номинальной подаче), м	90
Коэффициент быстроходности	300 ÷ 329
Рабочая температура теплоносителя, $^{\circ}\text{C}$	290 ÷ 300
Рабочее давление на входе, МПа	$16^{+0,2}$
Мощность агрегата, кВт	5250
Номинальное напряжение питающего тока, В	10000
Частота вращения (синхронная), об/мин	1000
Кавитационный запас, при температуре теплоносителя 300°C , МПа	9,6
КПД, не менее %	76
Масса (масса электродвигателя), т	140 (41,7)
Высота, мм	10300
Срок службы, не менее, лет	60
Средняя наработка на отказ, не менее, ч	18000
Средний ресурс между средними ремонтами, не менее, ч	25200
Коэффициент готовности, не ниже	0,99
Теплоноситель	вода борированная
Организационная протечка воды, не более, $\text{м}^3/\text{ч}$	1,2

Компоновочная схема проекта 1391 приведена на рисунке 30.

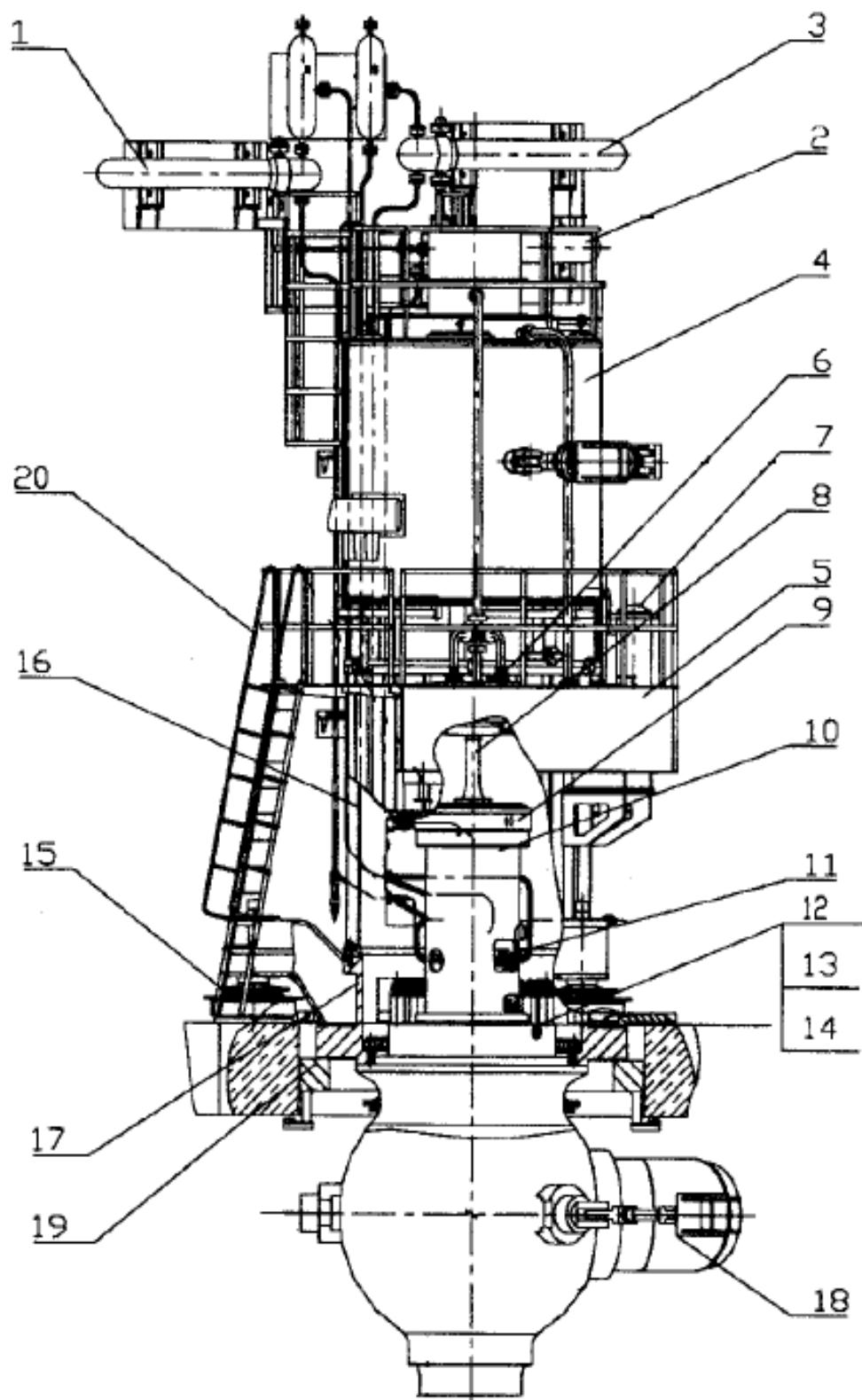


Рисунок 30 – Компоновочная схема проекта 1391

Основные узлы проекта 1391:

- 1 – холодильник автономного контура; 2 – холодильник блока уплотнения;
- 3 – холодильник радиально-осевого подшипника; 4 – двигатель; 5 – маслобак;

6 – электронасос; 7 – маслоохладитель; 8 – муфта торсионная; 9 – электромагнит; 10 – подшипник радиально-осевой; 11 – блок уплотнений; 12 – корпус; 13 – подшипник радиальный нижний; 14 – колесо рабочее; 15 – опора роликовая; 16 – проставка верхняя; 17 – проставка нижняя; 18 – корпус сферический; 19 – кольцо биологической защиты; 20 – площадка обслуживания.

Данные проекта 1732

Проект 1732 представляет собой вертикальный электронасосный агрегат, состоящий из следующих составных элементов и систем:

- одноступенчатого насоса с механическим уплотнением вала, подшипниками, смазываемыми водой;
- гидравлического корпуса – литой улитки из нержавеющей стали;
- асинхронного односкоростного электродвигателя переменного тока (напряжение 10 кВ) с маховиком и системой смазки на воде;
- вспомогательной системы автономного контура;
- системы подачи воды в уплотнение;
- контура охлаждения радиально-осевого подшипника;
- промежуточных контуров охлаждения, обеспечивающих нормальную работу агрегата;
- площадок обслуживания;
- кольца биологической защиты;
- системы технического диагностирования (СТД).

Вал насоса связан с валом электродвигателя жесткой муфтой. Агрегат имеет единый радиально-осевой подшипник, встроенный в двигатель, что обеспечивает меньшая длина вала. Вал на трех опорах. Расположением вспомогательных систем на одной стене бокса.

В качестве привода агрегата для реакторов типа ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 используется односкоростной вертикальный асинхронный электродвигатель, рассчитанный на длительный режим работы на частоте вращения 1000 об/мин.

Основные технические характеристики проекта 1732 приведены в таблице 27.

Таблица 27 – Основные технические характеристики проекта 1732

Подача номинальная, м ³ /ч	22600
Напор (при номинальной подаче), МПа (м)	87 _{-3,5} ^{+3,5}
Коэффициент быстроходности	300 ÷ 329
Рабочая температура теплоносителя, °С	300
Рабочее давление на входе, МПа	16 ^{+0,2}
Мощность агрегата, кВт	5100
Номинальное напряжение питающего тока, В	10000
Частота вращения (синхронная), об/мин	1000
Кавитационный запас, при температуре теплоносителя 300°C, МПа	9,6
КПД, не менее %	76
Масса (масса электродвигателя), т	130 (41,7)
Высота, мм	9500
Срок службы, не менее, лет	60
Средняя наработка на отказ, не менее, ч	18000
Средний ресурс между средними ремонтами, не менее, ч	24000
Коэффициент готовности, не ниже	0,95
Теплоноситель	вода борированная
Организационная протечка воды, не более, м ³ /ч	1,2

Компоновочная схема проекта 1732 приведена на рисунке 31.

Основные узлы проекта 1732:

- 1 – кольцо биозащиты; 2 – воздухоохладитель; 3 – шпильки главного разъема;
- 4 – торсион; 5 – устройство опорное; 6 – холодильник автономного контура;
- 7 – доохлаждающий холодильник блока уплотнения; 8 – проставка верхняя;
- 9 – преставка нижняя; 10 – корпус сферический; 11 – часть насоса выемная;
- 12 – двигатель

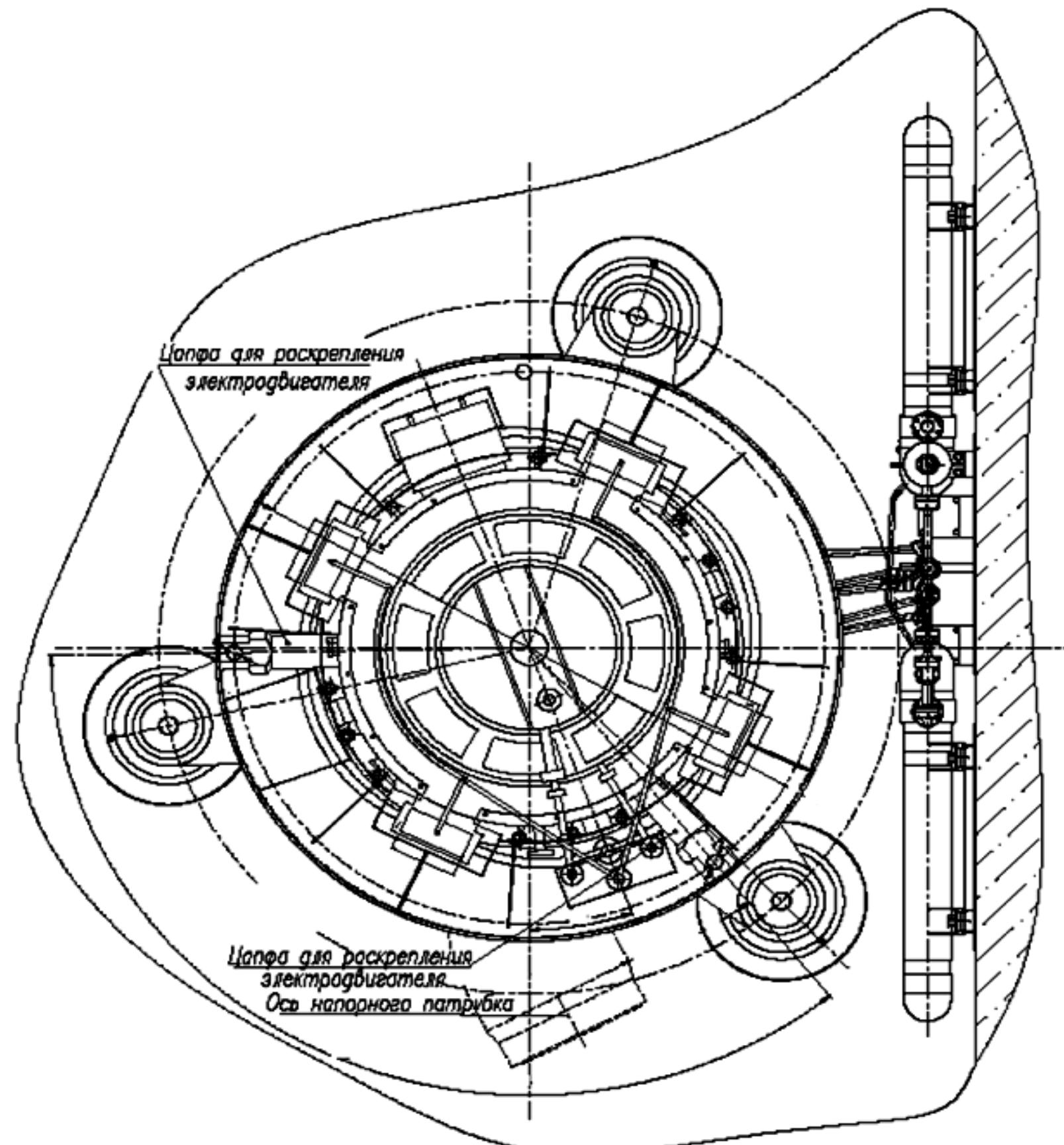
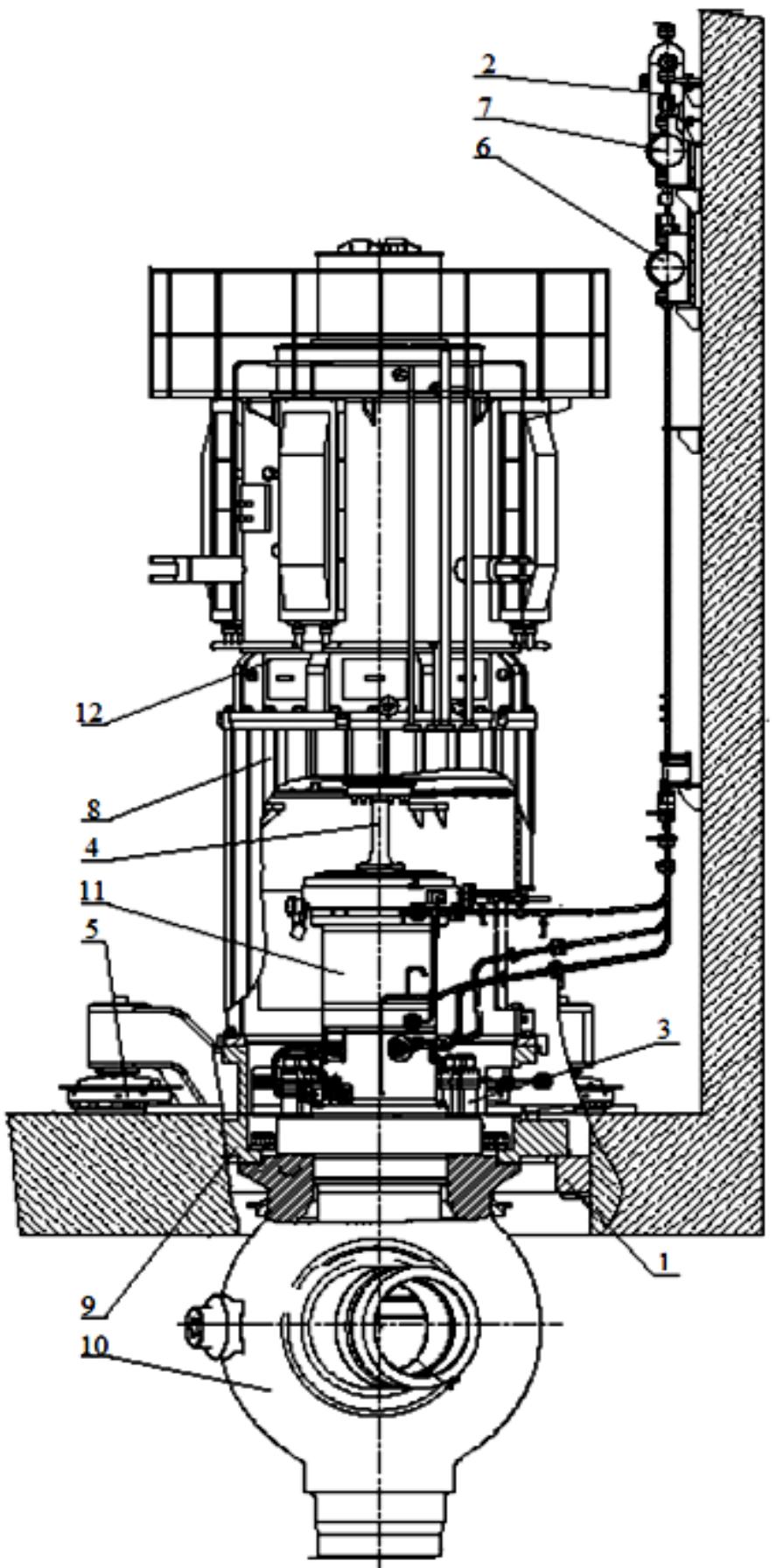


Рисунок 31 – компоновочная схема проекта 1732

Данные проекта 1753

Проект представляет собой центробежный, вертикальный, одноступенчатый насосный агрегат с блоком торцевого уплотнения вала от протечек радиоактивной воды первого контура на основе силицированного графита, консольным рабочим колесом центробежного типа, осевым подводом воды и выносным асинхронным электродвигателем с маховиком.

Конструкция имеет схему единого вала с тремя подшипниками и жесткой муфтой. Система охлаждения и смазки всех трёх опорных подшипников насоса и электродвигателя использует воду и размещается на самом агрегате.

Основные части насоса изготавливаются из нержавеющей стали, гидравлическая часть представляет собой стальной сварно-кованный сферический корпус.

Проект 1753 оснащен поясами раскрепления для восприятия сейсмических нагрузок, упорами для ограничения аварийного перемещения при разрыве трубопровода первого контура и устанавливается на подвижных роликовых опорах.

Компоновочная схема проекта 1753 приведена на рисунке 32.

Проект 1753 - циркуляционный насосный агрегат без маслосистемы, в котором все узлы смазываются и охлаждаются водой, в том числе узлы электродвигателя.

Преимущества конструкции проекта 1753:

- отсутствие масла в реакторном отделении (повышена пожаробезопасность);
- за счет исключения одного подшипника уменьшение потребляемой электроэнергии и как следствие повышения КПД;
- максимальная унификация и референтность с проектом 1391 узлами, имеющими опыт эксплуатации;
- высокая надежность;
- уменьшение массы и габаритов;

- размещение вспомогательного оборудования на агрегате, что обеспечивает больше свободного пространства в боксе;
- упрощение доступа к радиально-опорному подшипнику обеспечивает возможность его ремонта без демонтажа двигателя – сокращение сроков ремонта;
- увеличение межремонтного периода в 1,5 раза, что позволит эксплуатировать проект 1753 на АЭС с 18-ти месячным топливным циклом.

Основные технические характеристики проекта 1753 приведены в таблице 28.

Таблица 28 – Основные технические характеристики проекта 1753 (по данным ОКР)

Подача номинальная, м ³ /ч	22000
Напор (при номинальной подаче), м	87±3,5
Коэффициент быстроходности	300 ÷ 329
Рабочая температура теплоносителя, °C	300
Рабочее давление на входе, МПа	16,0 ^{+0,2}
Мощность агрегата, кВт	4900
Номинальное напряжение питающего тока, В	10000
Частота вращения (синхронная), об/мин	1000
Кавитационный запас, при температуре теплоносителя 300°C, МПа	9,6
КПД, не менее %	78
Масса (масса электродвигателя), т	120 (40,5)
Высота, мм	7300
Срок службы, не менее, лет	60
Средняя наработка на отказ, не менее, ч	19000
Средний ресурс между средними ремонтами, не менее, ч	48000
Коэффициент готовности, не ниже	0,99
Теплоноситель	вода борированная
Организационная протечка воды, м ³ /ч, не более	1,1

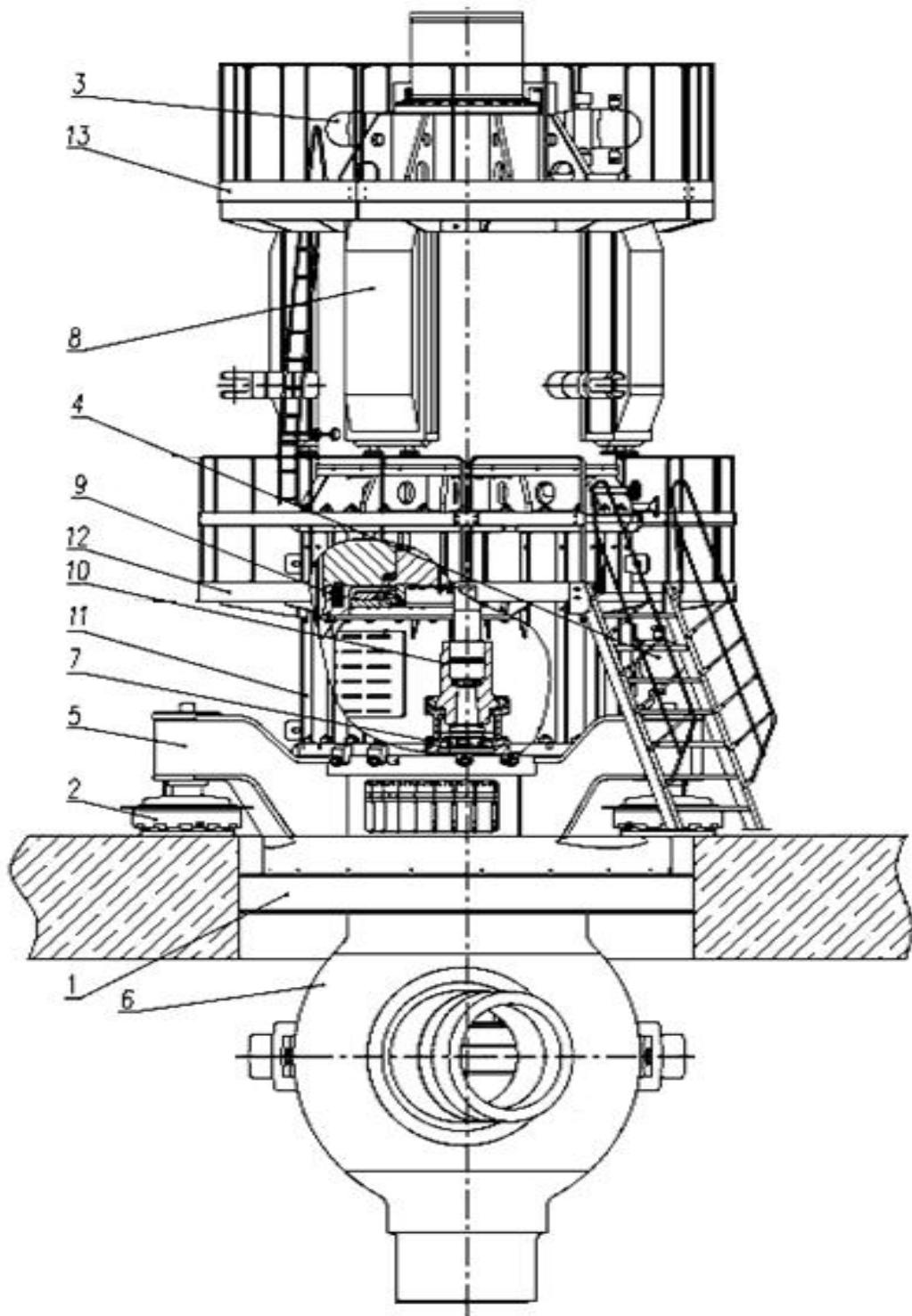


Рисунок 32 – Компоновочная схема проекта 1753

Основные узлы проекта 1753:

1 – кольцо биозащиты; 2 – устройство опорное; 3 – холодильник автономного контура; 4 – доохлаждающий холодильник блока уплотнений; 5 – проставка нижняя; 6 – корпус сферический; 7 – часть насоса выемная; 8 – двигатель; 9 – электромагнит; 10 – муфта; 11 – преставка верхняя; 12,13 – площадки обслуживания.

Пример оценки компоновочных решений с применением функции желательности Харрингтона по критерию КПД приведен на рисунке 33.

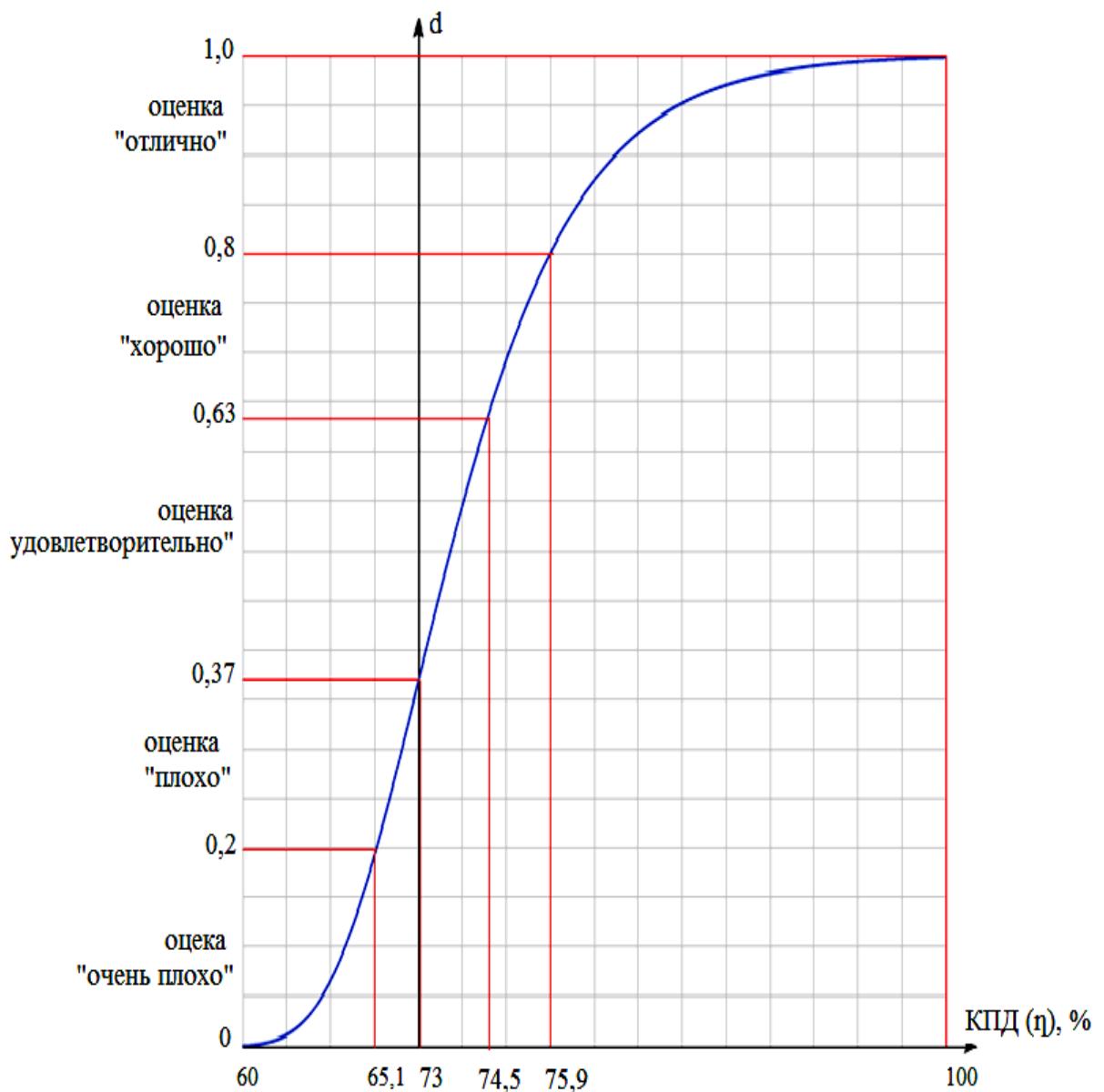


Рисунок 33 – График желательности Харрингтона для оценки критерия КПД.

Состав экспертной комиссии: конструктор-разработчик, начальник конструкторского отдела; главный технолог; начальник расчетной лаборатории; главный конструктор по насосному оборудованию, председатель комиссии - технический директор.

При сравнении компоновочных решений насосного оборудования из базы проектов и синтезированного проекта для АЭС были получены следующие результаты.

Распределение весовых коэффициентов групп показателей качества по результатам анкетирования экспертной комиссии приведены на рисунке 34.

Итоговая таблица оценок компоновочных решений насосного оборудования с учетом рисков, таблица 29. Графическое отображение результатов многокритериального анализа компоновочных решений, рисунок 35.



Рисунок 34 - Распределение весовых коэффициентов групп показателей качества

Таблица 29 – Итоговая суммарная оценка компоновочных решений и величин рисков принятия решения

№ п/п	Обозначение компоновки	Суммарная оценка экспертной комиссии	Величина риска (критерий Сэвиджа)
1	1391	73,03	0,255
2	1732	60,99	0,267
3	1753	73,47	0,101

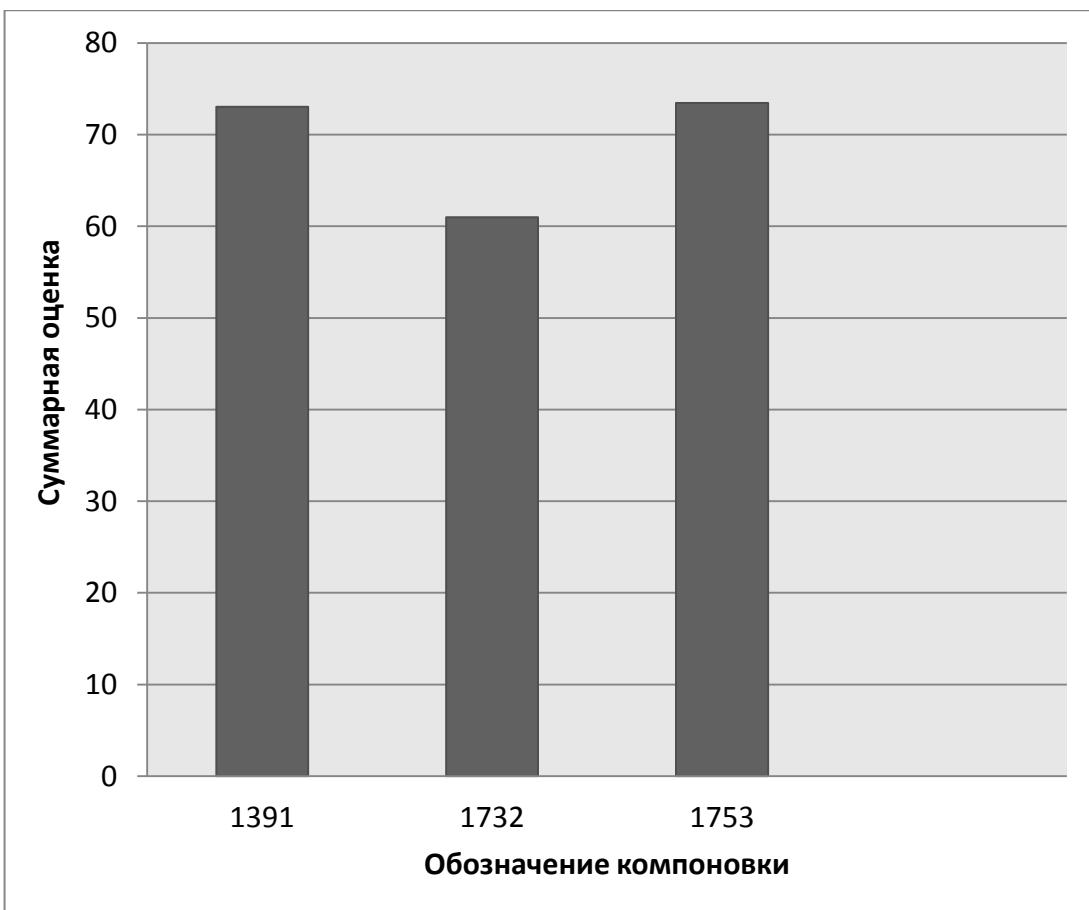


Рисунок 35 - Результаты многокритериального анализа компоновочных решений насосного оборудования при сравнении синтезированной конструкции и конструкций из базы проектов

По результатам сравнения компоновочных решений насосного оборудования для дальнейшей проработки было утверждено компоновочное решение № 2 – проект 1753, эффективность выбора данного решения оценивается минимальным значением критерия риска из числа оцениваемых решений – 0,101.

4.2 Рекомендации по применению разработанной методики

В целях внедрения разработанной методики в деятельность организации рекомендуется разработать документ системы менеджмента качества.

В зависимости от степени внедрения в организации системы менеджмента, руководящий документ может быть оформлен в виде инструкции или стандарта.

В общем случае нормативный документ будет содержать разделы приведенные ниже.

1 Область применения и сфера действия

В этом разделе определяется цель применения методики верификации проекта в организации, определяются подразделения и должностные лица, участвующие в процессе.

2 Нормативные ссылки

В этом разделе указываются все нормативные документы как, внешние так и внутренние, необходимые для выполнения работ по верификации проекта.

3 Термины,определения, обозначения и сокращения

В разделе указываются специальные термины, определения, обозначения и сокращения, применяемые в данном документе.

4 Общие положения

В разделе указывается ответственность и полномочия участников процесса.

Определяется набор показателей качества для расчета определяющего показателя и критериев риска.

5 Методика оценки проекта

Раздел содержит порядок применения методики оценки и выбора оптимального компоновочного решения на начальном этапе технического проектирования с целью верификации проекта.

В разделе указываются:

5.1 Требования к формированию экспертной комиссии, такие как: состав экспертной группы, секретарь комиссии, председатель комиссии.

В состав экспертной группы рекомендуется обязательно включать: конструктора-разработчика проекта; начальника конструкторского отдела по направлению; главного технолога/ начальника технологического отдела; начальника расчетной лаборатории обоснования надежности конструкций; главного конструктора по направлению. Председатель комиссии – руководитель конструкторской службы. Секретарь – сотрудник отдела качества.

5.2 Требования к выбору шкал оценивания

Для оценивания конструкций из базы проектов рекомендуется применять шкалу 0/ 2/ 4-балла.

Для оценивания существующих конструкций из базы проектов и новых конструкций рекомендуется применять шкалу желательности Харрингтона.

5.3 Значения весовых коэффициентов групп показателей качества, применяемых для оценки проекта. Значения весовых коэффициентов рассчитываются для каждого вида оцениваемого оборудования с применением программного обеспечения.

5.4 Квалиметрическая модель оценки

В этом подразделе описывается методика свертки единичных и комплексных показателей качества оцениваемого оборудования.

При оценке конструкций из базы проектов для свертки показателей качества оптимальным по трудоемкости, точности и скорости обработки данных является метод смешанного средневзвешенного.

При оценке конструкций из базы проектов и новых компоновок применяется формула Харрингтона, дополненная весовыми коэффициентами.

5.5 Интерпретация результатов оценки

В этом подразделе указывается критерий выбора и утверждения компоновочного решения. Указывается лицо принимающее решение – ответственный, за утверждение выбранной компоновки. Указываются требования к сроку хранения результатов оценивания.

Также в нормативный документ рекомендуется включить следующие разделы:

- приложение (обязательное) Блок-схема процесса верификации проекта оборудования;
- приложение (справочное) Форма опросного листа;
- приложение (обязательное) Форма протокола утверждения компоновочного решения проекта оборудования;
- лист регистрации изменений;
- лист ознакомления.

В АО «ЦКБМ» методика выбора оптимального компоновочного решения оборудования внедрена совместным применением программы «ОцКом» и стандарта системы менеджмента качества организации «Верификация проекта оборудования». Стандарт определяет порядок применение разработанной методики и программного обеспечения для повышения качества процесса конструкторского проектирования. Текст стандарта приведен в Приложении Г.

4.3 Выводы к главе 4

В результате апробации методики выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования в условиях реального проектирования и производства можно сделать следующие выводы:

- применение методики позволило снизить субъективный фактор при принятии решения о выборе прототипа компоновочного решения насосного оборудования для конкретного проекта АЭС;
- разработанная методика выбора оптимального компоновочного решения автоматизирована, что позволило сократить трудоемкость принятия решения на начальном этапе технического проектирования;
- разработаны рекомендации по применению методики и программы «ОцКом» в организациях, занимающихся вопросами проектирования насосного оборудования;
- в связи с введением в действие в 2015 году ГОСТ Р ИСО 9001-2015 (ISO 9001:2015) и GSR Part 2 в современных проектах требуется обязательное внедрение риск-ориентированного мышления на каждом этапе жизненного цикла продукции, разработанная методика и ее реализация в программном обеспечении обеспечили внедрение риск-ориентированного мышления на начальном этапе технического проектирования насосного оборудования;
- внедрение риск-ориентированного мышления позволило улучшить процесс конструкторского проектирования за счет снижения рисков выбора неоптимального компоновочного решения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе поставлена и решена актуальная в научном отношении и практически важная задача по разработке методики выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования для АЭС. Получены следующие основные результаты:

1. Проведен системный анализ процесса конструкторское проектирование насосного оборудования для АЭС, в результате которого определен этап процесса, требующий улучшения, а именно начальный этап стадии «техническое проектирование».
2. Предложена уточненная классификация основных показателей качества насосного оборудования на начальном этапе технического проектирования, отличающаяся тем, что оценка проводится по семи группам показателей качества: показатели назначения; показатели технической и энергетической эффективности; конструктивные и технологические показатели; показатели надежности; требования к безопасности и охране окружающей среды; эстетические и эргономические показатели; требования к транспортированию и хранению. Стандартизованная группа «показателя назначения» дополнена показателем «коэффициент быстроходности».
3. Впервые разработана квалиметрическая модель оценки синтезированного компоновочного решения насосного оборудования, позволяющая оптимизировать выбор компоновочного решения насосного оборудования для АЭС.
4. Впервые разработан алгоритм выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования с оценкой рисков, возникающих при подготовке проектной документации.
5. Разработанный алгоритм и квалиметрическая модель оценки компоновочного решения насосного оборудования реализованы в программном обеспечении, позволяющем автоматизировать процесс принятия решения по выбору компоновки насосного оборудования (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 20176150350).

6. Основные результаты исследований приняты к использованию и внедрены в:

– процесс конструкторского проектирования насосного оборудования АО «Центральное конструкторское бюро машиностроения», методика выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования для АЭС реализована в стандарте организации «Верификация проекта оборудования»;

– учебном процессе Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова в рабочих программах дисциплин «Конструирование и производство типовых приборов и устройств», «Менеджмент и инжиниринг качества» и «Инженерные методы обеспечения качества продукции».

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АК	– автономный контур
АО «ЦКБМ»	– акционерное общество «Центральное конструкторское бюро машиностроения»
АСУ	– автоматизированная система управления
АЭС	– атомная электрическая станция
ВВЭР	– водо-водяной энергетический реактор
ВР	– высшее руководство;
ГК «Росатом»	– Государственная корпорация по атомной энергии
ГЦН	– главный циркуляционный насос
ГЦНА	– главный циркуляционный насосный агрегат
ДВДАЗ	– двигатель асинхронный двухскоростной вертикальный
ИСА РАН	– институт системного анализа Российской академии наук (РАН)
ИППР	– системы интеллектуальной поддержки принятия решений
КИУМ	– коэффициент использования установленной мощности
КПД	– коэффициент полезного действия
ЛПР	– лицо принимающее решение
МАГАТЭ	– международное агентство по атомной энергии
МАИ	– метод анализа иерархий
НБСК	– насосы с бетонной спиральной камерой
НО	– насосное оборудование
ОКР	– опытно-конструкторские работы
ОУ	– объект управления
ОцКом	– программа по выбору компоновочного решения при проектировании технических систем
РК	– рабочее колесо насоса
Роспатент	– Федеральная служба по интеллектуальной собственности

Ростехнадзор РФ – Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору Российской Федерации

РУ	– реакторная установка
РФ	– Российская Федерация
СМК	– система менеджмента качества организации
СПИИРАН	– Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН
СППР	– системы поддержки принятия решений
СТД	– система технического диагностирования
ТЗ	– техническое задание
ТВЕЛ	– тепловыделяющий элемент
ТКИ	– показатель технологичности конструкции изделия
ТС	– техническая спецификация
ТУ	– технические условия
ТЭС	– тепловая электростанция
ФИПС	– Федеральный институт промышленной собственности
ЦБН	– центробежный насос
ЭВМ	– электронно-вычислительная машина
ЭД	– электродвигатель
ЯЭУ	– ядерная энергетическая установка
ABWR	– advanced boiling water reactor (улучшенный кипящий реактор)
ALSTOM	– крупная французская машиностроительная компания, один из мировых лидеров в производстве энергетического оборудования и железнодорожного транспорта
ASME	– американское общество инженеров-механиков
BWR	– boiling water reactor ([корпусной] реактор с кипящей водой)
EDF	– крупнейшая государственная энергетическая компания Франции и крупнейшая в мире компания-оператор атомных электростанций
ISO (ИСО)	– международная организация по стандартизации

- NEI – журнал Nuclear Engineering International (Великобритания)
- PRIS – база данных МАГАТЭ по энергетическим реакторам
- STUK – государственное агентство Финляндии, осуществляющее
контроль радиационной безопасности в стране
- YVL – руководящие указания по ядерной безопасности STUK

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» официальный сайт, [URL:http://rosatom.ru](http://rosatom.ru),(дата обращения 25.01.2017);
2. Группа компаний Росатом АО «Атомэнергомаш», официальный сайт, URL: <http://atomenergomash.ru>, (дата обращения 25.01.2017);
3. Брюнин, С.В. Развитие ядерной энергетики в странах Ближнего Востока. Часть I – Иран и Арабская Республика Египет/ С.В. Брюнин//Атомная техника за рубежом. – 1978. – №4. – С.23...26.
4. Малюшенко, В.В. Современные энергетические насосы фирм капиталистических стран для ТЭС и АЭС/ В.В. Малюшенко, Н.К. Ржебаев, Э.Е. Ржебаева// Теплоэнергетика. – 1985. – №2. – С.73...77.
5. Малюшенко, В.В. Насосы зарубежного производства для ТЭС и АЭС/ В.В. Малюшенко, Н.К. Ржебаев, Э.Е. Ржебаева// Энергетическое машиностроение (НИИ Эинформэнергомаш). – 1987. – вып. 9. – с.22...28, 34...35.
6. Дрейпер, Е. Атомная энергетика в Соединенных Штатах Америки/ Е. Дрейпер// Атомная техника за рубежом. – 1995. – №12. – С.23...28.
7. Елагин, Ю.П. Ядерная индустрия в странах Дальнего Востока/ Ю.П. Елагин//Атомная техника за рубежом. – 1996., – №5. – С.3...9.
8. Маяновский, М.С. Проектирование и строительство новых АЭС в Японии/ М.С. Маяновский// Атомная техника за рубежом. – 2003. – №2. – С.17...22.
9. Беркович, В.М. Создание энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР нового поколения/ В.М. Беркович, А.Б. Малышев, Ю.В. Швыряев//Теплоэнергетика. – 2003. – №11. – С.2...9.
10. Беркович, В.М. Особенности проекта АЭС нового поколения с реактором ВВЭР-1000 повышенной безопасности/ В.М. Беркович, И.И. Копытов, Г.С. Таранов //Теплоэнергетика. – 2005. – №1. – С.9...15.

11. Драгунов, Ю.Г. Совершенствование проектов реакторных установок/ Ю.Г. Драгунов, С.Б. Рыжов, В.А. Мохов// Теплоэнергетика. – 2006. – №1. – С.2...10.
12. Елагин, Ю.П. Инновационные проекты ядерных энергетических систем/ Ю.П. Елагин // Атомная техника за рубежом. – 2006. – №7. – С.15...25.
13. Елагин, Ю.П. Состояние и перспективы развития ядерной энергетики Китая/ Ю.П. Елагин // Атомная техника за рубежом. – 2007. – №9. – С.9...13.
14. Cacuci, D.G. (Ed.) Handbook of Nuclear Engineering/ Cacuci, D.G. (Ed.). – Volume I. – Moscow: Springer, 2010. – 3600 p.
15. Nuclear Engineering International, Vol 16, №185, 1971 (October). – P.845...869.
16. Nuclear Engineering International, Vol 17, №196, 1972 (September). – P.704...707.
17. Nuclear Engineering International, Vol 18, № 205, 1973 (June). – P.477...493.
18. Nuclear Engineering International, Vol 18, № 207, 1973 (August). – P.646...649.
19. Nuclear Engineering International, Vol 20, № 233, 1975 (August). – P. 606...617.
20. Nuclear Engineering International, Vol 20, №234, 1975 (September). – P.665...672, 675...678.
21. Nuclear Engineering International, Vol 20, №236, 1975 (November). – P. 935...949.
22. Nuclear Engineering International, Vol 21, №247, 1976 (August). – P.39...46.
23. Nuclear Engineering International, Vol 21, №248, 1976 (September). – P. 58...60.
24. Nuclear Engineering International, Vol 22, №262, 1977 (September). – P.33...34.

25. Nuclear Engineering International, Vol 22, №263, 1977 (November). – P.55...64, 66...68
26. Nuclear Engineering International, Vol 22, №265, 1977 (December). – P.37...54.
27. Nuclear Engineering International, Vol 23, №279, 1978 (December) – P. 31...43.
28. Nuclear Engineering International, Vol 25, №295, 1980 (February) – P.37...48, 51...54.
29. Nuclear Engineering International, Vol 26, №318, 1981 (September), – P. 33...39.
30. Nuclear Engineering International, Vol 27, №335, 1982 (December). – P.34...36, 41...46.
31. Nuclear Engineering International, Vol 29, №352, 1984 (March). – P. 27...31.
32. Nuclear Engineering International, Vol 29, №361, 1984 (October). – P. 35...37.
33. Nuclear Engineering International, Vol 30, №365, 1985 (February) - P. 26...35.
34. Nuclear Engineering International, Vol 31, №380, 1986 (March). – P. 30...37.
35. Nuclear Engineering International, Vol 31, №381, 1986 (April). – P. 38...41.
36. Nuclear Engineering International, Vol 31, №386, 1986 (September). – P. 32...39.
37. Nuclear Engineering International, Vol 32, №398, 1987 (September). – P. 27...32.
38. Nuclear Engineering International, Vol 32, №399, 1987 (November). – P.43...45, 59...60.
39. Nuclear Engineering International, Vol 33, №410, 1988 (September). – P. 52, 54.

40. Nuclear Engineering International, Vol 33, №412, 1988 (November). – P.22...28.
41. Nuclear Engineering International, Vol 33, №413, 1988 (December). – P. 60...66.
42. Nuclear Engineering International, Vol 34, №4210, 1989 (September). – P. 52.
43. Nuclear Engineering International, Vol 42, №511, 1997 (February). – P.12...16.
44. Nuclear Engineering International, Vol 47, №572, 2002 (March). – P. 34...35.
45. Nuclear Engineering International, Vol 47, №579, 2002 (October). – P. 20...22.
46. Nuclear Engineering International, Vol 48, №584, 2003 (March). – P. 17...22.
47. Nuclear Engineering International, Vol 48, №585, 2003 (April). – P. 24...27.
48. Nuclear Engineering International, Vol 48, №591, 2003 (October). – P.22...29.
49. Постановление Правительства РФ от 3 февраля 2010 г. №50 «О федеральной целевой программе «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010-2015 годов и на перспективу до 2020 года», с изм. от 03.02.2016, URL:<http://www.consultant.ru>, (дата обращения 14.06.2017)
50. Цветков, А. Интеграция оборудования турбинного острова АЭС в России /A. Цветков, V. Jourdain// Power Russia. – 2009;
51. Синев, Н.М. Бессальниковые водяные насосы/ Н.М. Синев, П.М.Удовиченко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Атомиздат, 1972.– 494 с.
52. Будов, В.М. Конструирование основного оборудования АЭС: учебное пособие для вузов/ В.М. Будов, В.А. Фарафонов. – М.: Энергоатомиздат, 1985.– 264 с.

53. Марцинковский, В.А. Насосы атомных электростанций/ В.А. Марцинковский, П.Н. Ворона.– М.: Энергоатомиздат, 1987.– 256 с.
54. Насосы АЭС: справочное пособие/ П.Н. Пак, А.Я. Белоусов, А.И. Тимшин и др.– М.: Энергоатомиздат, 1989.– 328 с.
55. Митенков, Ф.М. Главные циркуляционные насосы АЭС/ Ф.М. Митенков, Э.Г. Новинский, В.М. Будов. – 2-е изд., перераб. и доп.– М.: Энергоатомиздат, 1990.– 376 с.
56. Пак, П.Н. Насосное оборудование атомных станций/ П.Н. Пак, А.Я. Белоусов, С.П. Пак.– М.: Энергоатомиздат, 2003.– 450 с.
57. Насосное и теплообменное оборудование АЭС: учебное пособие для студентов вузов/ С.М. Дмитриев, В.Б. Платонов, А.Г. Орлов, Н.М. Сорокин, В.А. Фарафонов, В.С. Шишкин.– Нижний Новгород: Изд-во Нижегор. гос. техн. ун-та, 2004.– 397 с.
58. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (НП-089-15), в ред. Приказа Ростехнадзора от 17.01.2017 №11, [URL:https://www.seogan.ru/np-089-15-pravila-ustroystva-i-bezopasnoiy-ekspluatacii-oborudovaniya-i-truboprovodov-atomnix-energeticheskix-ustanovok.html](https://www.seogan.ru/np-089-15-pravila-ustroystva-i-bezopasnoiy-ekspluatacii-oborudovaniya-i-truboprovodov-atomnix-energeticheskix-ustanovok.html), (дата обращения 25.01.2017);
59. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (НП-001-15), Приказ Ростехнадзора от 17.12.2015 №522, [URL:https://www.seogan.ru/np-001-15-obshie-polozheniya-obespecheniya-bezopasnosti-atomnix-stanciy.html](https://www.seogan.ru/np-001-15-obshie-polozheniya-obespecheniya-bezopasnosti-atomnix-stanciy.html), (дата обращения 14.06.2017)
60. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-008-89 с изм.1 от 14.08.2006), [URL:https://www.seogan.ru/pnae-g-7-008-89-pravila-ustroystva-i-bezopasnoiy-ekspluatacii-oborudovaniya-i-truboprovodov-atomnix-energeticheskix-ustanovok.html](https://www.seogan.ru/pnae-g-7-008-89-pravila-ustroystva-i-bezopasnoiy-ekspluatacii-oborudovaniya-i-truboprovodov-atomnix-energeticheskix-ustanovok.html) (дата обращения 14.06.2017)
61. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций (НП-031-01), в ред. Постановления Ростехнадзора от 19.10.2001 № 9,

URL:<https://www.seogan.ru/np-031-01-normi-proektirovaniya-seiysmostoikix-atomnix-stanciiy.html> ,(дата обращения 14.06.2017)

62. Фаворский, О.Н. Об энергетике России в ближайшие 20-30 лет/ О.Н. Фаворский// Вестник Российской академии наук.— 2007. — Т.77 - № 2 – С. 121-127

63. Портал «Российское атомное сообщество», официальный сайт, URL:<http://www.atomic-energy.ru>

64. РД 50.1.028-2001 Методология функционального моделирования IDEF0 Руководящий документ. Издание официальное. — М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. — 75 с.

65. ГОСТ Р ИСО 9001-2015 Межгосударственный стандарт Системы менеджмента качества Требования – М.: Стандартинформ, 2015. – 32с

66. Харрингтон, Дж. Управление качеством в американских корпорациях/ Дж Харрингтон. – М.: Экономика, 1990 – 231с.

67. ГОСТ Р ИСО 3100-2010 Менеджмент риска. Принципы и руководство - М.: Стандартинформ, 2012. – 21с

68. GSR Part 2 General Safety Requirements. Leadership and Management for Safety – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, VIENNA, 2016. – 47 p.

69. YVL E.9 Guide. Pumps of a nuclear facility – STUK, Helsinki, 2014 – 24 p.

70. ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section III, Division 1, Subsection NC-3400 Pump Design – ASME, New York City, 2017 – 380 p.

71. Виноградова, Г.С. Система менеджмента качества в атомной энергетике/ Виноградова Г.С./сборник докладов Конференции «Шаг в будущее:...». – СПб.: Изд-во «КультИнформПресс», 2015. – 25-27 мая. – 174с. - С 32-34, URL:<http://www.spbipm.ru/1366019043/май 2015>

72. Виноградова, Г.С. Международные и национальные требования к системе менеджмента качества в атомной энергетике/ Г.С. Виноградова //Энергетика: Эффективность, надежность, безопасность: материалы XXI всероссийской научно-технической конференции Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во «Скан», 2015. – 1Т. -446с. – С 303-305.

73. Виноградова, Г.С. Внедрение риск-ориентированного мышления по ГОСТ Р ИСО 9001-2015 при изготовлении продукции для ОИАЭ/ Г.С. Виноградова//Экономические аспекты развития энергетики. Энергия-2016. Одиннадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, 5-7 апреля 2016 г., г. Иваново: материалы конференции. – Иваново: ИГЭУ, 2016. – в 6т. – Том 6. -96 с. – С.8-9.

74. Труды СПИИРАН. Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, официальный сайт
[URL: http://proceedings.spiiras.nw.ru](http://proceedings.spiiras.nw.ru)

75. Труды Института системного анализа РАН, официальный сайт
[URL: http://www/isa.ru/proceedings](http://www/isa.ru/proceedings)

76. Попков, Ю.С. Системные исследования. Методологические проблемы/ Ю.С.Попков, В.И. Тищенко и др./ Ежегодник 2013-2014: системный подход, системный анализ, системное моделирование. Методология междисциплинарных исследований. Серия: Труды Института системного анализа РАН. – Вып.37 – 2014. 456 с.

77. Кини, Р. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и размещения/ Кини, Р., Райфа, Х. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.

78. Егоров, С.Я. Методика решения задачи компоновки в цехах ангарного типа/ Е.Н. Малыгин, С.Я. Егоров, М.С. Громов // Химическая промышленность сегодня. – 2006. – №6, – С. 55-59.

79. Ларичев, О.И. Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных странах: учебник/ О.И. Ларичев – М.: Логос, 2000. – 296 С.: ил.

80. Мартемьянов, Ю.Ф. Экспертные методы принятия решений: учебное пособие/ Ю.Ф. Мартемьянов, Т.Я. Лазарева. – Тамбов Издательство ТГТУ, 2010г., – 41с.

81. Белов, А.В. Информационно-системные основы анализа и оценки надежности артиллерийских орудий на стадии НИОКР/ А.В. Белов, В.В. Вяшенко, В.А. Шурыгин. – СПб.: БГТУ, Междунар. акад. информатизации, 1998. – 75с. ил.

82. Новинский, Э.Г. Исследования по созданию главных циркуляционных насосов для АЭС и ЯЭУ: диссертация...доктора технических наук: 05.04.11/ Новинский Эрнест Георгиевич.- Нижний Новгород, 1992. – 365 с.: ил.
83. ГОСТ 17398-73 Насосы. Термины и определения – М.: Государственный комитет СССР по стандартам. – переиздание 1991 – 38с.
84. ГОСТ 4.1118-84 Оборудование насосное. Номенклатура основных показателей, с изм. №1 от 01.01.1988 – М.: Государственный комитет СССР по стандартам. – 10 с.
85. Бурмистров, А.И. Лопастные и объемные гидравлические машины. Гидропередачи : учеб. пособие/ А.И. Бусырев и др.; под общ. ред. В.А. Умова.- СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010 – 280 с.
86. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения – М.: Стандартинформ. – 2016 – 24 с.
87. ГОСТ 24656-81 Насосы циркуляционные первого контура энергоблоков атомных электростанций с реакторами ВВЭР. Типы, основные параметры и общие технические требования – М.: Государственный комитет СССР по стандартам. – 1982 – 8 с.
88. РД 5064-84 Методические указания по разработке государственных стандартов, устанавливающих номенклатуру показателей качества групп однородной продукции: руководящий документ – М.: Государственный комитет СССР по стандартам. – 1985 – 63 с.
89. Аристов, А.И. Ремонтопригодность машин/ А.И. Аристов, П.Н. Волков, Л.Г. Дубицкий и др. – М.: Машиностроение, 1975. – 368 с.
90. Кириллов, Н. П. Признаки класса и определение понятия «технические системы»/ Н. П. Кириллов // Авиакосмическое приборостроение. – 2009. – № 8
91. Виноградова, Г.С. Оценка качества и показатели качества ремонтируемой продукции/ Г.С. Виноградова// Сборник докладов Конференции «Инновации в формировании стратегического вектора развития фундаментальных и прикладных научных исследований, 20-21 ноября 2015года, г. Санкт-

Петербург.– СПб.: Изд-во «КультИнформПресс», 2015 - 260 с. – С.89-91, URL: <http://www.spbipm.ru/1366019043/ноябрь 2015>

92. Хамханова, Д.Н. Основы квалиметрии: учебное пособие/ Д.Н. Хамханова. – Улан-Удэ: Издательство ВСГТУ,2006г. – 142с.
93. Хамханова, Д.Н. Теоретические основы обеспечения единства экспертных измерений учебное пособие/ Д.Н. Хамханова. – Улан-Удэ: Издательство ВСГТУ,2006г. – 167с.
94. Саати, Т.Л.Принятие решений. Метод анализа иерархий/ Т.Л. Саати. — М.: Радио и связь, 1989. — 316 с.
95. Подиновский, В.В.О некорректности методв анализа иерархий/ В.В. Подиновский, О.В. Подиновская// Проблемы управления. — 2011. — №1 — С.8..13.
96. Кини, Р.Л. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и размещения/ Кини, Р.Л., Райфа, Х. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.
97. Рейзлин, В.И. Численные методы оптимизации: учебное пособие/ В.И. Рейзлин; Томский политехнический университет. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011 — 105с.
98. Черноиванова, Е.А. Исследование операций: курс лекций: учебное пособие/ Е.А. Черноиванова; Саран. кооп. ин-т РУК. — Саранск: Принт-Издат, 2014. — 132с.
99. Зайцев, М.Г. Методы оптимизации управления и принятия решений: примеры, задачи, кейсы: учебное пособие/ М.Г. Зайцев, С.Е. Варюхин.— 2-е изд., испр. — М.: Изд-во «Дело» АНХ, 2008. — 664 с.
100. ГОСТ 15467-79 Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения, с изм.№1 – М.: Государственный комитет СССР по стандартам. – 27с.
101. Виноградова, Г.С. Оценка и выбор компоновочного решения при разработке оборудования для объектов использования атомной энергии с учетом компетентности привлекаемых экспертов/ Г.С. Виноградова, А.В Марков// Качество и жизнь. – 2016. – №2. – С.2-7.

102. Виноградова, Г.С. Алгоритм выбора прототипа конструкции на этапе технического проектирования насосного оборудования для объектов использования атомной энергии/ Г.С. Виноградова, А.В Марков// Вестник ИрГТУ Том 20. - №9. - 2016. – С.17-22.
103. Виноградова, Г.С. Применение экспертных методов при проектировании оборудования для опасных производственных объектов/ Г.С. Виноградова// Молодежь, техника, космос: материалы VIII Общероссийской молодежной науч.-техн. конф./ Бал. гос. техн. ун-т. - СПБ, 2016 – 60с. – С. 42
104. ГОСТ 23554.1-79 Экспертные методы оценки качества промышленной продукции. Организация и проведение экспертной оценки качества продукции – М.: Государственный комитет СССР по стандартам. – 31 с.
105. Ящерицын, П.Н. Планирование эксперимента в машиностроении. Справочное пособие/ П.Н. Ящерицын, Е.Н. Махаринский. – М.: Высш. шк.. 1985, – 286 с.
106. Иванищев, Ю.Г. Априорное ранжирование факторов: учебное пособие/ Ю.Г. Иванищев. – Хабаровск: Издательство ТОГУ, 2013, – 10с.
107. Бронштейн, И.Н., Семеняев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов/ И.Н. Бронштейн, К.А. Семеняев. – 13-е изд., испрavl. – М.: Наука, 1986. – 544 с.
108. Приказ 1/10 от 31.10.2013 г. Об утверждении метрологических требований к измерениям, эталонам единиц, величин, стандартным образцам, средствам измерений, их составным частям, программному обеспечению, методикам (методам) измерений, применяемым в области использования атомной энергии: офиц.текст. – ГК «Росатом»,[URL:http://rosatom.ru](http://rosatom.ru),(дата обращения 25.01.2017).
109. Адлер, Ю.А. и [др.] Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий/ Ю.А. Адлер, Е.В. Макарова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976 – 287с.

110. Пичкалев, А.В. Применение кривой желательности Харрингтона для сравнительного анализа автоматизированных систем контроля/ А.В. Пичкалев// Вестник КГТУ – Красноярск. – КГТУ,1997 – С 128-132.
111. Ларичев, О.И. Системы поддержки принятия решений. Современное состояние и перспективы их развития/ О.И. Ларичев, А.Б. Петровский // Итоги науки и техники. Техническая кибернетика. – ВИНИТИ,1987. – 156 с.
112. Энгель, Е.А. Модели и методы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений/ Е.А. Энгель// Вестник СибГУ им. академика М.Ф. Решетнева. – 2011– № 4(37) – С. 106...112
113. Сараев, А.Д. Системный анализ и современные информационные технологии/ А.Д. Сараев, О.А. Щербина // Труды Крымской Академии наук. – Симферополь: СОННАТ,2006
114. Половинкин, А.И. Автоматизация поискового конструирования (искусственный интеллект в машинном проектировании) / А.И. Половинкин, Н.К. Бобков, Г.Я. Буш. – М.: Радио и связь, 1981. – 83 с.
115. Половинкин, А.И. Основы инженерного творчества/А.И. Половинкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.
116. Соломенцев, Ю.М. Автоматизированное проектирование и производство в машиностроении/ Ю.М. Соломенцев, В.Г.Митрофанов, А.Ф. Прохоров [и др.] ; под общ. ред. Ю.М. Соломенцева, В.Г. Митрофанова. – М. : Машиностроение, 1986. – 256 с
117. Виноградова, Г.С. Автоматизация процесса выбора компоновки сложных технических систем/А.В. Марков, Г.С. Виноградова, А.И. Денисенко, А.А. Хлебников //Вестник ИрГТУ Том 20 .-№11. - 2016. – С.94-101.
118. Vinogradova G.S. Automation of qualimetric method of selecting layout solution of pumping equipment for NPPS/Vinogradova G.S./ International scientific journal “Mathematical modeling”//Scientific technical union of mechanical engineering “Industry 4.0”. – Sofia, Bulgaria. – 2017. – 74p. - P. 41-43, URL:<http://mathmodel.eu/sbornik/1-2017.pdf>

119. Керниган, Б. Язык программирования Си/ Б. Керниган Д, Ритчи. – пер. с англ., 3-е изд. – СПб :Невский Диалект, 2001 – 352с.
120. Кондаков, А.И. САПР технологических процессов: учебник для студ. высш. учеб. заведений/ А.И. Кондаков. – М.: Академия, 2007 – 272с.
121. Программа по выбору компоновочного решения при проектировании технических систем: св-во RU 2017615035 Рос. Федерации. № 20199.3881 заявл. от 19.12.2016; опубл. 02.05.2017, Бюл. № 5-2017.

**Приложение А Листинг «Программа по выбору компоновочного
решения при проектировании технических систем»**

MyForm.h (строки с 1 по 12)

```
#pragma once
#include "math.h"

namespace Komponovka2 {

    using namespace System;
    using namespace System::ComponentModel;
    using namespace System::Collections;
    using namespace System::Windows::Forms;
    using namespace System::Data;
    using namespace System::Data::OleDb;
    using namespace System::Drawing;
```

MyForm.h (строки с 4468 по 4487)

```
private: System::Void textBox3_TextChanged(System::Object^ sender,
System::EventArgs^ e) {
    Trs = Convert::ToInt32(textBox3->Text);
    if
        (Trs <= 290 && Trs >= 270) textBox3->ForeColor =
    ForeColor.Black, label37->Visible = false, textBox14->Text = textBox3->Text, Kb =
    (3.65*n_vrasch*sqrt(Spod)) / pow(Napor, 0.75), textBox5->Text = Kb.ToString();
    else
    {
        textBox3->ForeColor = ForeColor.Red;
        label37->Visible = true;
    }
}
```

```

private: System::Void textBox4_TextChanged(System::Object^ sender,
System::EventArgs^ e) {
    Pa = Convert::ToInt32(textBox4->Text);
    if
        (Pa <= 15.30 && Pa >= 12.22) textBox4->ForeColor
        =
        ForeColor.Black, label38->Visible = false;
    else
    {
        textBox4->ForeColor = ForeColor.Red;
        label38->Visible = true;
    }
}

```

MyForm.h (строки с 4540 по 4561)

```

private: System::Void textBox15_TextChanged(System::Object^ sender,
System::EventArgs^ e) {
    par1 = Convert::ToSingle(textBox15->Text);
    if
        (par1 <= 7 && par1 >= 1) textBox15->ForeColor
        =
        ForeColor.Black, label44->Visible = false;
    else
    {
        textBox15->ForeColor = ForeColor.Red;
        label44->Visible = true;
    }
}

```

```

private: System::Void textBox16_TextChanged(System::Object^ sender,
System::EventArgs^ e) {
    par2 = Convert::ToSingle(textBox16->Text);
    if
        (par2 <= 7 && par2 >= 1)      textBox16->ForeColor
        = ForeColor.Black, label44->Visible = false;
    else
    {
        textBox16->ForeColor = ForeColor.Red;
        label44->Visible = true;
    }
}

```

MyForm.h (строки с 4854 по 4868)

```

private: System::Void comboBox7_SelectedIndexChanged(System::Object^
sender, System::EventArgs^ e) {
    if (comboBox7->SelectedIndex != 0) p1=0;
    if (comboBox7->SelectedIndex != 1) p1 = 2;
    if (comboBox7->SelectedIndex != 2) p1 = 4;
}

private: System::Void comboBox8_SelectedIndexChanged(System::Object^
sender, System::EventArgs^ e) {
    if (comboBox8->SelectedIndex != 0) p2 = 0;
    if (comboBox8->SelectedIndex != 1) p2 = 2;
    if (comboBox8->SelectedIndex != 2) p2 = 4;
}

```

```

private:    System::Void    comboBox9_SelectedIndexChanged(System::Object^
sender, System::EventArgs^ e) {
    if (comboBox9->SelectedIndex != 0) p3=0;
    if (comboBox9->SelectedIndex != 1) p3 = 2;
    if (comboBox9->SelectedIndex != 2) p3 = 4;
}

```

MyForm.h (строки с 4612по 4663)

```

private:    System::Void    button4_Click(System::Object^           sender,
System::EventArgs^ e) {
    for (n = 1; n <= 7; n++) {
        count = 0;
        if (par1 == n)      count = count + 1;
        if (par2 == n)      count = count + 1;
        if (par3 == n)      count = count + 1;
        if (par4 == n)      count = count + 1;
        if (par5 == n)      count = count + 1;
        if (par6 == n)      count = count + 1;
        if (par7 == n)      count = count + 1;
        if (par1 == n && count != 1) par1 = par1 + 1 / count;

        if (par2 == n && count != 1) par2 = par2 + 1 / count;
        if (par3 == n && count != 1) par3 = par3 + 1 / count;
        if (par4 == n && count != 1) par4 = par4 + 1 / count;
        if (par5 == n && count != 1) par5 = par5 + 1 / count;
        if (par6 == n && count != 1) par6 = par6 + 1 /
count;
    }
}

```

```
    if (par7 == n && count != 1) par7 = par7 + 1 /  
count;  
}  
  
textBox15->Text = par1.ToString();  
textBox16->Text = par2.ToString();  
textBox17->Text = par3.ToString();  
textBox18->Text = par4.ToString();  
textBox20->Text = par5.ToString();  
textBox21->Text = par6.ToString();  
textBox22->Text = par7.ToString();  
  
Sa1 = Sa1 + par1;  
Sa2 = Sa2 + par2;  
Sa3 = Sa3 + par3;  
Sa4 = Sa4 + par4;  
Sa5 = Sa5 + par5;  
Sa6 = Sa6 + par6;  
Sa7 = Sa7 + par7;  
  
beta1 = 1 / Sa1;  
beta2 = 1 / Sa2;  
beta3 = 1 / Sa3;  
beta4 = 1 / Sa4;  
beta5 = 1 / Sa5;  
beta6 = 1 / Sa6;  
beta7 = 1 / Sa7;  
  
SumBeta = beta1 + beta2 + beta3 + beta4 + beta5 + beta6 + beta7;  
alf1 = beta1 / SumBeta;  
alf2 = beta2 / SumBeta;  
alf3 = beta3 / SumBeta;  
alf4 = beta4 / SumBeta;  
alf5 = beta5 / SumBeta;
```

```

alf6 = beta6 / SumBeta;
alf7 = beta7 / SumBeta;
textBox25->Text = count.ToString();
dataGridView7->Rows->Insert(id-1, textBox23->Text->ToString(),
textBox24->Text->ToString(), String::Format("{0}", par1), String::Format("{0}",
par2), String::Format("{0}", par3), String::Format("{0}", par4), String::Format("{0}",
par5), String::Format("{0}", par6), String::Format("{0}", par7));
}

```

MyForm.h (строки с 4671 по 4740)

```

private: System::Void button2_Click(System::Object^ sender,
System::EventArgs^ e) {
    tabControl2->SelectedIndex = 2;
    id = dataGridView9->RowCount;
    if (id > 0) {
        label47->Visible = true;
        comboBox7->Visible = true;
        comboBox8->Visible = true;
        comboBox9->Visible = true;
        comboBox10->Visible = true;
        comboBox11->Visible = true;
        comboBox12->Visible = true;
        comboBox13->Visible = true;
        if (id >= 2) {
            label48->Visible = true;
            comboBox14->Visible = true;
            comboBox15->Visible = true;
            comboBox16->Visible = true;
        }
    }
}

```

```
comboBox17->Visible = true;  
comboBox18->Visible = true;  
comboBox19->Visible = true;  
comboBox20->Visible = true;  
if (id >= 3) {  
    label49->Visible = true;  
    comboBox21->Visible = true;  
    comboBox22->Visible = true;  
    comboBox23->Visible = true;  
    comboBox24->Visible = true;  
    comboBox25->Visible = true;  
    comboBox26->Visible = true;  
    comboBox27->Visible = true;  
    if (id = 4) {  
        label50->Visible = true;  
        comboBox28->Visible = true;  
        comboBox29->Visible = true;  
        comboBox30->Visible = true;  
        comboBox31->Visible = true;  
        comboBox32->Visible = true;  
        comboBox33->Visible = true;  
        comboBox34->Visible = true;  
  
    }  
    else  
    {  
        button13->Visible = true;  
        tabControl2->SelectedIndex = 2;  
    }  
}
```

```

    }
}

id = dataGridView7->RowCount;
if (id >= 1) {
    label56->Visible = true;
    if (id >= 2) {
        label57->Visible = true;
        if (id >= 3) {
            label58->Visible = true;
            if (id >= 4) {
                label59->Visible = true;
            }
        }
    }
}

label56->Text = ">>> Первый эксперт";
}

```

MyForm.h (строки с 4746 по 4853)

```

private:     System::Void     button12_Click(System::Object^           sender,
System::EventArgs^ e) {

    id = dataGridView7->RowCount;
    if (cnt == 1) {
        textBox35->Text = dataGridView7->Rows[cnt]->Cells[0]->Value-
>ToString();
        textBox36->Text = dataGridView7->Rows[cnt]->Cells[1]->Value-
>ToString();
    }
}

```

```

Ksum1 = p1*alf1 + p2*alf2 + p3*alf3 + p4*alf4 + p5*alf5 + p6*par6
+ p7*alf7;

Ksum2 = k1*alf1 + k2*alf2 + k3*alf3 + k4*alf4 + k5*alf5 + k6*par6
+ k7*alf7;

Ksum3 = r1*alf1 + r2*alf2 + r3*alf3 + r4*alf4 + r5*alf5 + r6*par6 +
r7*alf7;

Ksum4 = s1*alf1 + s2*alf2 + s3*alf3 + s4*alf4 + s5*alf5 + s6*par6
+ s7*alf7;

Sum1 = Sum1 + Ksum1;

Sum2 = Sum2 + Ksum2;

Sum3 = Sum3 + Ksum3;

Sum4 = Sum4 + Ksum4;

}

if (cnt == 2) {
    textBox35->Text = dataGridView7->Rows[cnt]->Cells[0]->Value-
>ToString();
    textBox36->Text = dataGridView7->Rows[cnt]->Cells[1]->Value-
>ToString();
    label56->Text = "Первый эксперт", label57->Text = ">>>
Второй эксперт";
    Ksum1 = p1*alf1 + p2*alf2 + p3*alf3 + p4*alf4 + p5*alf5 + p6*par6
+ p7*alf7;

    Ksum2 = k1*alf1 + k2*alf2 + k3*alf3 + k4*alf4 + k5*alf5 + k6*par6
+ k7*alf7;

    Ksum3 = r1*alf1 + r2*alf2 + r3*alf3 + r4*alf4 + r5*alf5 + r6*par6 +
r7*alf7;

    Ksum4 = s1*alf1 + s2*alf2 + s3*alf3 + s4*alf4 + s5*alf5 + s6*par6
+ s7*alf7;

    Sum1 = Sum1 + Ksum1;

    Sum2 = Sum2 + Ksum2;
}

```

```

Sum3 = Sum3 + Ksum3;
Sum4 = Sum4 + Ksum4;
}

if (cnt == 3) {
    textBox35->Text = dataGridView7->Rows[cnt]->Cells[0]->Value-
>ToString();
    textBox36->Text = dataGridView7->Rows[cnt]->Cells[1]->Value-
>ToString();
    label57->Text = " Второй эксперт", label58->Text = ">>> Третий
эксперт";
    Ksum1 = p1*alf1 + p2*alf2 + p3*alf3 + p4*alf4 + p5*alf5 + p6*par6
+ p7*alf7;
    Ksum2 = k1*alf1 + k2*alf2 + k3*alf3 + k4*alf4 + k5*alf5 + k6*par6
+ k7*alf7;
    Ksum3 = r1*alf1 + r2*alf2 + r3*alf3 + r4*alf4 + r5*alf5 + r6*par6 +
r7*alf7;
    Ksum4 = s1*alf1 + s2*alf2 + s3*alf3 + s4*alf4 + s5*alf5 + s6*par6
+ s7*alf7;

    Sum1 = Sum1 + Ksum1;
    Sum2 = Sum2 + Ksum2;
    Sum3 = Sum3 + Ksum3;
    Sum4 = Sum4 + Ksum4;
    if (cnt != id + 1);
    else
    {
        tabControl2->SelectedIndex = 5;
    }
}

if (cnt == 4) {

```

```

    textBox35->Text = dataGridView7->Rows[cnt]->Cells[0]->Value-
>ToString();

    textBox36->Text = dataGridView7->Rows[cnt]->Cells[1]->Value-
>ToString();

    label58->Text = "      Третий эксперт", label59->Text = ">>>
Четвертый эксперт";

    Ksum1 = p1*alf1 + p2*alf2 + p3*alf3 + p4*alf4 + p5*alf5 + p6*par6
+ p7*alf7;

    Ksum2 = k1*alf1 + k2*alf2 + k3*alf3 + k4*alf4 + k5*alf5 + k6*par6
+ k7*alf7;

    Ksum3 = r1*alf1 + r2*alf2 + r3*alf3 + r4*alf4 + r5*alf5 + r6*par6 +
r7*alf7;

    Ksum4 = s1*alf1 + s2*alf2 + s3*alf3 + s4*alf4 + s5*alf5 + s6*par6
+ s7*alf7;

    Sum1 = Sum1 + Ksum1;

    Sum2 = Sum2 + Ksum2;

    Sum3 = Sum3 + Ksum3;

    Sum4 = Sum4 + Ksum4;

    if (cnt != id);

    else

    {

        tabControl2->SelectedIndex = 5;

    }

}

textBox30->Text = Sum1.ToString();

textBox31->Text = Sum2.ToString();

textBox32->Text = Sum3.ToString();

textBox33->Text = Sum4.ToString();

if (Sum1 > Sum2) {

```

```
if (Sum1 > Sum3) {  
    if (Sum1 > Sum4) Max = Sum1;  
    else {  
        Max = Sum4;  
    }  
  
}  
else {  
    if (Sum3 > Sum4) Max = Sum3;  
    else  
    {  
        Max = Sum4;  
    }  
}  
}  
else {  
    if (Sum2 > Sum3) {  
        if (Sum2 > Sum4) Max = Sum2;  
        else  
        {  
            Max = Sum4;  
        }  
    }  
}
```

```
if (Max == Sum1) textBox30->BackColor=BackColor.Aquamarine,  
dataGridView9->Rows[0]->Cells[0]->Style->BackColor = BackColor.Aquamarine;  
if (Max == Sum2) textBox31->BackColor = BackColor.Aquamarine,  
dataGridView9->Rows[1]->Cells[0]->Style->BackColor = BackColor.Aquamarine;  
if (Max == Sum3) textBox32->BackColor = BackColor.Aquamarine,  
dataGridView9->Rows[2]->Cells[0]->Style->BackColor = BackColor.Aquamarine;  
if (Max == Sum4) textBox33->BackColor = BackColor.Aquamarine,  
dataGridView9->Rows[3]->Cells[0]->Style->BackColor = BackColor.Aquamarine;  
if (cnt == id - 1) button12->Text = "К результатам экспертного анализа";  
cnt++;  
}
```

**Приложение Б. Свидетельство о государственной регистрации
программы для ЭВМ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017615035

**Программа по выбору компоновочного решения при
проектировании технических систем**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Балтийский
государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им.
Д.Ф. Устинова» (RU)*

Авторы: *Марков Андрей Валентинович (RU), Виноградова Галина
Сергеевна (RU), Денисенко Александр Игоревич (RU), Хлебников
Александр Александрович (RU)*

Заявка № **2016663881**

Дата поступления **19 декабря 2016 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **02 мая 2017 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Геннадий Г. Ильин

Г.П. Ильин



Приложение В Акты внедрения

Акт внедрения АО «Центральное конструкторское бюро машиностроения», (АО «ЦКБМ»)



**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ЦЕНТРАЛЬНОЕ КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО МАШИНОСТРОЕНИЯ»
(АО «ЦКБМ»)**

Набережная Обводного канала, д. 138, корп.1, лит. Б, г.Санкт-Петербург, 190020
Телефон: +7 (812) 676-63-00 Факс: +7 (812) 336-54-81 E-mail: postbox@ckbm.ru
ОКПО 08624639, ОГРН 1089847327415 ИНН 7806394392/КПП 783450001

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель генерального директора –
исполнительный директор АО ЦКБМ,
кандидат технических наук
Щуцкий С.Ю.
19 » 09 2017 г.



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы аспиранта
Балтийского государственного технического университета
«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова
Виноградовой Галины Сергеевны на тему:
«Методика выбора оптимального компоновочного решения насосного
оборудования для атомных электростанций»

Настоящий акт подтверждает, что в проектных работах АО «Центральное конструкторское бюро машиностроения», связанных с утверждениями конструкции «антиреверсное устройство» проекта АЭС «Куданкулам» и компоновочного решения насосного оборудования проекта «Белорусская АЭС» нашли практическое применение и внедрены научные положения, разработанные Виноградовой Г.С., в том числе:

- уточненный состав показателей качества характеризующих компоновочное решение насосного оборудования на начальном этапе технического проектирования, включающий коэффициент быстроходности;
- квалиметрическая модель оценки синтезированного компоновочного решения насосного оборудования с применением функции желательности Харрингтона;
- алгоритм выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования с оценкой рисков при подготовке проектной документации по критерию Сэвиджа.

Главный конструктор
по насосному оборудованию,
кандидат технических наук

Р.П. Казанцев

Акт внедрения ФГБОУ ВПО БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова



УТВЕРЖДАЮ
Первый проректор – проректор по
образовательной деятельности
В.А. Бородавкин
«14» 09 2017 г.

АКТ
о внедрении результатов диссертационной работы аспиранта
Балтийского государственного технического университета
«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова
Виноградовой Галины Сергеевны на тему:
«Методика выбора оптимального компоновочного решения насосного
оборудования для атомных электростанций»

В учебном процессе Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова при подготовке бакалавров (профиль: «Стандартизация, управление качеством и метрология») и магистров (магистерская программа: «Стандартизация, управление качеством и метрология в приборостроении») по направлению «Стандартизация и метрология» в дисциплинах «Конструирование и производство типовых приборов и устройств», «Менеджмент и инжиниринг качества» и «Инженерные методы обеспечения качества продукции» используются результаты исследований Виноградовой Г.С., отраженные в рабочих программах дисциплин и учебно-методических комплексах, а именно:

- алгоритм разработки квалиметрических моделей оценки компоновочного решения технической системы с применением функции желательности Харрингтона;
- алгоритм выбора оптимального компоновочного решения технической системы с оценкой рисков при подготовке проектной документации по критерию Сэвиджа.

Председатель комиссии,
д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой И2
«Инжиниринг и менеджмент качества»

 Марков А.В.

Член комиссии,
канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры И2
«Инжиниринг и менеджмент качества»

 Жарков М.Ф.

Член комиссии,
канд. техн. наук, доцент кафедры И2
«Инжиниринг и менеджмент качества»

 Ефремов Н.Ю.

**Приложение Г Стандарт организации «Верификация проекта
оборудования»**

СТО 12-02-01-2017

**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
“Центральное конструкторское бюро машиностроения”**



**СТАНДАРТ
ОРГАНИЗАЦИИ** СТО 12-02-01-00-2017

**Верификация проекта
оборудования**

Санкт-Петербург
2017

Предисловие

Сведения о стандарте

- 1 РАЗРАБОТАН конструкторским отделом КО-304 и отделом качества 108
- 2 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ приказом № 37/425-П от 20.03.2017 г.
- 3 ДАТА ВВЕДЕНИЯ 21.03.2017 г.

© АО «ЦКБМ», 2017

Охраняется на правах интеллектуальной собственности

Содержание

1. Область применения и сфера действия.....	4
2. Нормативные ссылки.....	5
3. Термины, определения, обозначения и сокращения.....	5
4. Общие положения.....	7
5. Методика оценки проекта.....	8
6. Приложение А (обязательное) Блок-схема процесса верификации оборудования.....	13
7. Приложение Б (рекомендуемое) Фрагмент опросного листа.....	14
8. Приложение В (обязательное) Форма протокола утверждения компоновочного решения проекта оборудования.....	15
9. Лист регистрации изменений.....	16
10.Лист ознакомления.....	17

1 ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ И СФЕРА ДЕЙСТВИЯ

1.1. Настоящий стандарт организации устанавливает процесс верификации проекта оборудования, с целью утверждения оптимального компоновочного решения проекта оборудования, согласно требованиям технической спецификации (ТС) Заказчика.

Настоящий стандарт направлен на выполнение требований ГОСТ Р ИСО 9001-2015 (ISO 9001:2015) п 8.3, Руководств YVL A.3 и устанавливает требования к проведению верификации проекта.

Целью стандарта является: создание такого процесса разработки конструкторской документации, при котором будет обеспечено изготовление продукции, отвечающей требованиям договора (контракта), требованиям ТС, нормативно-техническим и правовым документам, а так же документам системы менеджмента качества (СМК) организации.

Положения настоящего стандарта распространяются на процесс разработки оборудования, предназначенного для объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) и других отраслей промышленности, так же разработку продукции, применяемой при модернизации, продлении срока эксплуатации ОИАЭ.

1.2 Положения настоящего стандарта распространяются на подразделения и руководителей, участвующих в процессе разработки конструкторской документации: конструкторские отделы; отделы договоров; отделы исполнения проектов; отдел качества; технологический отдел; службу опытно-экспериментальных разработок.

1.3 Результаты верификации проекта используются:

- высшим руководством, как элемент входных данных для анализа СМК;
- конструкторским отделом и главным конструктором по направлению для утверждения выбора компоновочного решения оборудования (продукции) с целью выпуска технического задания (ТЗ);

- внутренними и внешними аудиторами, заказчиком при проведении аудитов;
- при анализе, разработке и реализации мероприятий по совершенствованию СМК.

2 НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящем стандарте использованы ссылки на следующие документы:

- ГОСТ Р ИСО 9000-2015 «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь»;
- ГОСТ Р ИСО 9001-2015 «Системы менеджмента качества. Требования»;
- Руководство YVL A3-2014 «Система управления ядерной установкой»;
- ГОСТ 2.103-2013 «ЕСКД. Стадии разработки»;
- ГОСТ 2.120-73 (с изм. 1-5) «ЕСКД. Технический проект»;
- ГОСТ Р 15.301-2016 «СРПП. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство»;
- СТО 12-02-01-01-2015 «Стандарт организации. Разработка конструкторской документации»;
- СТО 12-00-01-02-2015 «Анализ системы менеджмента качества со стороны руководства».

3 ТЕРМИНЫ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

3.1 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины и определения, включенные в ГОСТ Р ИСО 9000-2015 и термины с соответствующими определениями, конкретизированные в настоящем стандарте:

Заказчик – юридическое или физическое лицо, по договору с которым производится создание или поставка продукции (в том числе научно-

СТО 12-02-01-00-2017

технической). Примечание – АО «Концерн Росэнергоатом», являясь заказчиком, одновременно является и потребителем продукции, работ и услуг.

Договор (контракт) – коммерческий документ, которым оформляются сделки по купле-продаже продукции (услуг).

Изделие – единица промышленной продукции, количество которой может исчисляться в штуках или экземплярах. Примечание – к изделиям допускается относить завершенные и незавершенные предметы производства, в том числе заготовки.

Нормативная и техническая документация – документы, устанавливающие требования. Примечание – в качестве таких документов могут использоваться процедуры, технологическая документация на процесс или методику испытаний, технические условия на продукцию, эксплуатационная документация, чертежи.

Оборудование – комплекс взаимосвязанных изделий, имеющих заданное функциональное назначение и предназначенных для использования самостоятельно или в составе другого оборудования.

Продукция – оборудование, изделия, включая средства технической диагностики, составные части этой продукции (в том числе программного обеспечения, необходимого для работы продукции), производимые АО «ЦКБМ».

Экспертная оценка – оценка тех или иных весовых коэффициентов группой специалистов (экспертов), обладающих необходимой компетенцией.

3.2 Обозначения и сокращения

В настоящем стандарте используются следующие обозначения и сокращения:

АО «ЦКБМ» - Акционерное общество «Центральное конструкторское

бюро машиностроения;

ЕСКД -единая система конструкторской документации;

КД - конструкторская документация;

НТД	- нормативная и техническая документация;
ОГТ	- отдел главного технолога;
ОпКом	- программное обеспечение, реализующие функции оценки компоновочного решения оборудования;
СМК	- система менеджмента качества;
СТО (П)	- стандарт организации (предприятия);
ТЗ	- техническое задание;
ТС	- техническая спецификация;
ТП	- технический проект;
ТУ	- технические условия.

4 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

4.1 Верификация проекта – подтверждение на основе предоставления объективных свидетельств того, что установленные требования выполнены.

Методы по подтверждению выходных данных процесса проектирования и разработки могут включать следующую деятельность: осуществление альтернативных расчетов; сравнение документации по новому проекту с аналогичной документацией по апробированному проекту; проведение испытаний и демонстраций; анализ документов до их выпуска (ГОСТ Р ИСО 9001, ГОСТ 2.103, ГОСТ 2.120, ГОСТ Р 15.301, СТО 12-00-01-02).

4.2 Ответственным за проведение и выбор методов верификации проекта в организации является главный конструктор по направлению.

Верификация процесса проектирования и разработки проводится на следующих этапах проектирования: выбор компоновочного решения оборудования для выпуска ТЗ; выпуск ТЗ; выпуск КД проекта; выпуск ТУ. Порядок и методы проведения верификации ТЗ, КД и ТУ определены в СТО 12-02-01-01.

4.3 Верификация выбора оптимального компоновочного решения проекта оборудования для выпуска ТЗ проводится по квалиметрической методике основанной на методе средневзвешенных экспертиз оценок.

Критерием оптимального выбора является максимальное значение оценки компоновки по суммарному определяющему показателю качества $K_{\text{сум_опр}}$ и минимальное значение критерия риска R_{\min} . Минимальное значение критерия риска (критерий Сэвиджа) позволяет сделать выбор, который приведет к наименее тяжелым последствиям, если выбор окажется ошибочным. Оценка проводится по семи группам показателей качества, приведенным в таблице 1.

5 МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРОЕКТА

5.1 Формирование экспертной комиссии проводится путем проверки согласованности мнений группы экспертов. Согласованность мнений экспертов проверяется на тестовом задании в программе «ОцКом». Анкетирование и расчет согласованности мнений экспертов в программе «ОцКом» проводят секретарь комиссии - сотрудник отдела качества. По результатам проверки согласованности мнений экспертов выпускается приказ о составе экспертной комиссии. В состав экспертной комиссии обязательно должны входить: конструктор-разработчик проекта; начальник конструкторского отдела; заместитель главного технолога/начальник технологического отдела; начальник расчетной лаборатории; главный конструктор по направлению. Секретарь комиссии – сотрудник отдела качества. Председатель комиссии – технический директор (руководитель конструкторской службы).

5.2 Методика оценки и выбора оптимального компоновочного решения оборудования состоит из трех частей:

- оценка и выбор компоновочного решения проектируемого оборудования при наличии подходящих решений из базы проектов и отсутствии новых компоновочных решений;
- оценка и выбор новых компоновочных решений проектируемого оборудования при отсутствии подходящих решений из базы проектов;
- оценка и выбор проектов подобранных из базы проектов и новых компоновочных решений.

В случае отсутствия подходящего компоновочного решения из базы проектов и нового компоновочного решения, соответствующих требованиям ТС, конструкторское подразделение обращается к разработчику ТС о корректировке требований.

Блок-схема алгоритма методики приведена в приложении А.

5.2.1 При поступлении ТС в работу, конструктор-разработчик проводит подбор компоновок из базы проектов, по заданным ТС параметрам. Подбор проводится конструктором-разработчиком в программе «ОцКом».

Если из базы проектов подобрано несколько компоновок предыдущих проектов, удовлетворяющих требования ТС и нет проектов новых компоновочных решений, конструктор-разработчик обращается к секретарю комиссии для проведения экспертной оценки подобранных компоновочных решений.

Конструктор-разработчик готовит справку, содержащую технические характеристики подобранных проектов и чертежи общего вида, и передает эти документы в электронном виде секретарю комиссии для подготовки опросных листов и проведения оценки в программе «ОцКом».

Секретарь комиссии проводит анкетирование экспертов с применением опросных листов. Фрагмент опросного листа приведен в приложении Б.

Проводится экспертная оценка подобранных компоновочных решений по группам показателей качества, характеризующих проект на этапе разработки ТЗ. Весовые коэффициенты групп показателей качества определены методом экспертных оценок. Значения весовых коэффициентов показателей качества для оценки компоновочного решения насосного оборудования приведены в таблице 1, графа «вес». Эксперты проставляют оценки компоновочных решений, подобранных из базы проектов по трехбалльной шкале: 4 балла – компоновка превышает требования ТС по *i*-му показателю качества; 2 балла – компоновка соответствует требованиям ТС по *i*-му показателю качества; 0 баллов – компоновка не соответствует требованиям ТС по *i*-му показателю качества.

Таблица 1 – Группы показателей качества проекта

<i>Наименование группы показателей качества продукции</i>	<i>Единичные и комплексные показатели качества, параметры сравнения</i>	<i>Свертка показателя</i>	<i>КБСР</i>
1. Показатели назначения	1.1. Подача 1.2 Напор 1.3 Частота вращения 1.4 Коэффициент быстроходности	$K_1 = \frac{\sum_{j=1}^4 \alpha_j \cdot K_j}{\sum_{j=1}^4 \alpha_j}$	0,260
2. Показатели технологической и энергетической эффективности	2.1 КПД 2.2 Кавитационный запас	$K_2 = \frac{\sum_{j=1}^2 \alpha_j \cdot K_j}{\sum_{j=1}^2 \alpha_j}$	0,197
3. Конструктивные и технологические показатели	3.1 Весовое совершенство 3.2 Соответствие геометрии маш.зала (компоновка боксов и расположение вспомогательных систем)	$K_3 = \frac{\sum_{j=1}^2 \alpha_j \cdot K_j}{\sum_{j=1}^2 \alpha_j}$	0,132
4. Показатели надежности	4.1 Коэффициент готовности 4.2 Ремонтопригодность 4.3 Сохранность в упаковке 4.4 Средний ресурс между средними ремонтами 4.5 Средняя наработка на отказ 4.6 Назначенный срок службы	$K_4 = \sqrt[6]{\prod_{j=1}^6 K_j^{\alpha_j}}$	0,158
5. Требования к безопасности и охране окружающей среды	5.1 Механическая безопасность 5.2 Электрическая безопасность 5.3. Термическая безопасность 5.4 Внешняя утечка	$K_5 = \sqrt[4]{\prod_{j=1}^4 K_j^{\alpha_j}}$	0,106
6. Эстетические и эргономические показатели	6.1 Вибрация 6.2 Шум 6.3. Внешняя доступность для ремонта электродвигателя 6.4. Расположение регулировочных и соединительных элементов 6.5. Потребность в высококвалифицированном обслуживающем персонале (шевронтаж, авторский надзор)	$K_6 = \frac{\sum_{j=1}^5 \alpha_j \cdot K_j}{\sum_{j=1}^5 \alpha_j}$	0,071
7. Требования к транспортированию и хранению	7.1 Расположение элементов раскрепления 7.2 Сохранность без упаковки	$K_7 = \frac{\sum_{j=1}^2 \alpha_j \cdot K_j}{\sum_{j=1}^2 \alpha_j}$	0,076

Определяющий показатель качества оценки проекта ($K_{\text{опред}}(K)$)	$\bar{K} = (K_1 + K_2 + K_3 + K_6 + K_7)/5 + \sqrt[3]{K_4 \cdot K_5}$ (1)
---	---

Определяющий показатель качества каждого проекта рассчитывается как свертка комплексных и единичных показателей качества, указанных в таблице 1, выражение (1). Оценки из опросных листов секретарь заносит в программу «ОцКом» и проводит расчет величины суммарного определяющего показателя качества и величину критерия риска выбора компоновочного решения.

5.2.2 В случае, если есть новые компоновочные решения и решения из базы предыдущих проектов, удовлетворяющие требованиям ТС, сравнение компоновок проводится так же экспертным методом с расчетом определяющего показателя качества и критерия риска. Конструктор-разработчик готовит справку, содержащую технические характеристики и чертежи общего вида подобранных из базы проектов и новых проектов, и передает эти документы в электронном виде секретарю комиссии для подготовки опросных листов и проведения оценки в программе «ОцКом».

Секретарь комиссии проводит анкетирование и рассчитывает результаты оценки в программе «ОцКом». Оценка проводится по показателям качества и группам показателей качества, приведённым в таблице 1. Эксперты выставляют оценки в опросных листах по шкале желательности Харрингтона.

В этом случае d_j – оценка по j -му показателю для k -й компоновки, определяется согласно функции желательности Харрингтона:

- $d_j \in [0; 0,2]$ — очень плохие данные по оцениваемому показателю качества;
- $d_j \in (0,2; 0,37]$ — плохие данные по оцениваемому показателю качества;
- $d_j \in (0,37; 0,63]$ — удовлетворительные данные по оцениваемому показателю качества;

- $d_j \in (0,63; 0,8]$ — хорошие данные по оцениваемому показателю качества;
- $d_j \in (0,8; 1,0]$ — отличные данные по оцениваемому показателю качества.

Определяющий показатель качества каждого проекта оборудования, рассчитывается по дополненной формуле Харрингтона, как среднее геометрическое взвешенное, выражением (2)

$$K_{\text{сумм}} = D = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n d_j^{\alpha_j}}. \quad (2)$$

5.2.3 Интерпретация полученных результатов

Секретарь комиссии проводит расчет суммарного определяющего показателя качества каждого оцениваемого проекта и критерия риска в программе «ОпКом». Секретарь комиссии оформляет протокол утверждения компоновочного решения проекта оборудования, приложение В.

Компоновка с максимальным значением определяющего показателя качества $K_{\text{сумм_опр}}$ и минимальным значением критерия риска $R_{\text{мин}}$, утверждается для дальнейшей конструктивной проработки и выпуска ТЗ.

5.3 Записи по результатам проведения верификации проекта

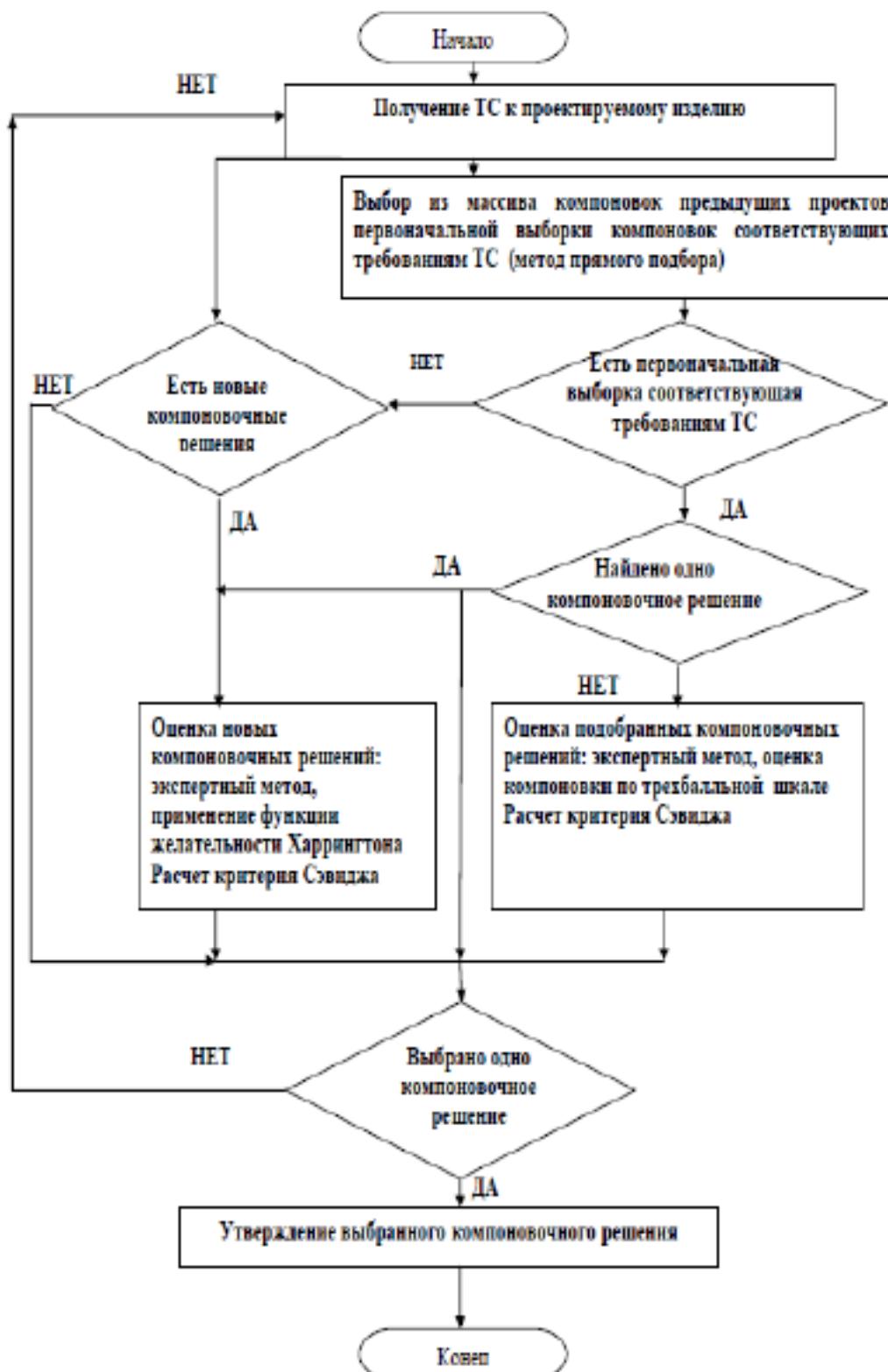
Проведение верификации проекта удостоверяется подписями лиц, проводивших анализ проекта в графе протокола «согласовано».

Утверждает протокол председатель комиссии – технический директор.

После утверждения компоновочного решения проекта оборудования протокол передается в конструкторский отдел для выпуска ТЗ, КД и ГУ. Протокол хранится в конструкторском отделе в деле «Экземпляр конструктора».

Срок хранения документации 75 лет.

Приложение А (обязательное) Блок-схема процесса верификации оборудования



Приложение Б (рекомендуемое) Фрагмент опросного листа

Комплексные показатели качества	Показатели качества и параметры сравнения	Номер оцениваемой компоновки						
		№ 1 Проект 1714	Средняя оценка по показателю	№ 2 Проект 1716	Средняя оценка по показателю	№ 3 Проект 1716-01	Средняя оценка по показателю	№ 4 Проект 1716-02
1. Показатели назначения	1.1 Подача							
	1.2 Напор							
	1.3 Частота вращения							
	1.4 Коэффициент быстроты							
2 Показатели технологической и энергетической эффективности	2.1 КПД							
	2.2 Кавитационный запас							
...

Приложение В (обязательное)**Форма протокола утверждения компоновочного решения проекта оборудования****Утверждаю**

____ / ____ /
подпись _____ Ф.И.О.

« ____ » _____
Дата

Протокол утверждения компоновочного решения проекта оборудования

Рассмотрены проекты:

- 1 _____
2 _____
3 _____
4 _____

Проведен анализ с применением квадратичной методики и программы «ОцКом»

Получены оценки суммарного определяющего показателя качества и значения критерия риска:

№ п.п.	Обозначение проекта	Оценка определяющего показателя качества	Значение критерия риска
1			
2			
3			
4			

Утвержден для разработки выпуска продукции по заказу _____ проект _____

Члены комиссии:

1. _____ «Согласовано»
 2. _____ «Согласовано»
 3. _____ «Согласовано»
 4. _____ «Согласовано»
 5. _____ «Согласовано»

Секретарь комиссии

дата

Лист регистрации изменений

Изменение	Номера листов (страниц)				Всего листов (страниц) в документе	№ документа	Входящий № сопроводительного документа и дата	Подпись	Дата
	изменённых	заменённых	новых	аннулированных					

Лист ознакомления

Отдел/ подразделение _____

№ п/п	Фамилия Имя Отчество	Подпись	Дата