

DOI:
**ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНЦИПОВ СИСТЕМНОЙ ИНЖЕНЕРИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ПРОЦЕССА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ПРОЕКТАХ АЭС**

Королев А.С.

*МИРЭА - Российский технологический университет, Россия, г. Москва,
Проспект Вернадского, дом 78
korolev@mirea.ru*

Коломиец М.А.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, г. Москва,
Каширское ш., дом 31
mariya.kolomiec.97@mail.ru*

Аннотация: Рассматривается возможность применения принципов и подходов системной инженерии на примере определения концепции системы охлаждения АЭС. Показывается, что использование принципов системной инженерии позволит уменьшить риск принятия неправильных решений на стадии разработки концепции, что приведет к сокращению затрат и сроков реализации проектов.

Ключевые слова: система технического водоснабжения, процесс принятия решений, системная инженерия, жизненный цикл, пруд-охладитель, градирня.

Введение

Для отвода сбросного тепла на АЭС используются системы технического водоснабжения. Они подразделяются на прямоточные и оборотные. В прямоточной системе водоснабжения используется природный источник. Это может быть река, озеро или море. Обратная система технического водоснабжения характеризуется многократным использованием циркуляционной воды с охлаждением ее в охладителях различного типа и с восполнением потерь воды в системе из источника водоснабжения. В качестве охладителей циркуляционной воды в системе из источника водоснабжения применяются водоемы-охладители, градирни различного типа, брызгальные бассейны или их сочетания. Водоемы-охладители и градирни используются для охлаждения 2-го контура АЭС, в то время как брызгальные бассейны для охлаждения 1-го контура АЭС. В данной публикации процесс принятия решений рассматривается только для 2-го контура АЭС (применение градирни или пруда-охладителя).

От выбранной системы технического водоснабжения существенным образом зависит температура воды на входе в конденсатор, следовательно, и тепловая экономичность АЭС.

На выбор системы охлаждения АЭС влияют следующие группы факторов:

1. Исходные технологические требования (требуемый уровень поддерживаемой температуры; допустимая трудоёмкость технического решения).
2. Местные климатические факторы (наличие больших источников воды; доступность неограниченного водозабора; продолжительность и характеристика жаркого периода).
3. Экологические факторы (парниковый эффект из-за водяного пара; утилизация продувочной воды; допустимый уровень шума).
4. Местные специфические факторы (степень развитости региона; плотность населения; роза ветров; социальная активность).
5. Технические факторы (ограничения по площади; допустимая потребляемая мощность).
6. Стоимостные факторы (срок окупаемости инвестирования, капитальные и эксплуатационные расходы; стоимость квалифицированного обслуживания).
7. Субъективные факторы (предпочтения инвесторов; предпочтения местных властей).
8. Послегарантийные проблемы оборудования (база данных по неисправностям на объектах; сведения об авариях; последствия аварийных ситуаций).

С учетом этих факторов осуществляется процедура многокритериального анализа альтернатив при выборе системы охлаждения. При этом ключевую роль играет наличие достаточного количества воды в районе размещения атомной станции (местные климатические факторы).

Несмотря на наличие известной и подробно описанной системы факторов, а также альтернативных концепций систем охлаждения, в проектах АЭС наблюдаются случаи неверного принятия решений, которые ведут к возрастанию стоимости проекта. Например, на Ростовской АЭС энергоблоки 1 и 2 используют для охлаждения воду из пруда-охладителя, тогда как 3 и 4 энергоблоки для уменьшения забора воды из Цимлянского водохранилища используют башенные градирни. Из-за высокой

температуры воздуха в летнее время, градирни не справляются с охлаждением воды и возникает необходимость в снижении мощности энергоблока, а содержащиеся в воде примеси менее чем за один год работы блока привели в негодность трубопроводную арматуру на градирне [1]. Похожие проблемы в проектах как систем охлаждения, так и других систем АЭС наблюдаются не только на Ростовской АЭС.

Очевидно, что задачу выбора альтернативных вариантов системных решений на стадиях жизненного цикла (ЖЦ) сложных систем целесообразно рассматривать не в качестве самостоятельной задачи принятия решений, а в качестве неотъемлемой составляющей процесса системной инженерии [2,3]. Авторы данной публикации полагают, что использование принципов системной инженерии в процессе принятия решений позволит предусмотреть все имеющиеся факторы системным образом, произвести верификацию принимаемого решения в соответствии с требованиями и валидацию решения в соответствии с потребностями заинтересованных сторон и ограничениями окружающей среды и системы верхнего уровня. Авторы рассматривают основные шаги такого процесса принятия решений и необходимые артефакты для его документирования и реализации.

1 Подход модели-ориентированной системной инженерии при разработке сложных систем

Методология современной системной инженерии (СИ) дает возможность рассматривать все аспекты создания и развития сложных систем в их полноте и взаимосвязи, что позволяет при управлении развитием крупномасштабной системы в существенной мере снизить риски, включая риски, возникающие на начальных стадиях и этапах ЖЦ АЭС.

Все известные методы (процессы) СИ предполагают итеративное применение процедур разработки системы, встраиваемых по определенным правилам в модель ЖЦ системы.

Одним из подходов к разработке систем, позволяющих выполнить анализ, синтез и оценку системных решений на разных уровнях описаний, является подход модели-ориентированной системной инженерии. Ниже представлены основные шаги такого подхода. Они даются в сокращенном варианте с целью демонстрации актуальности, практической значимости подхода, а также возможности его применения к решению задач в заявленной в статье предметной области. Более подробное описание подхода можно найти в [4,5] и других публикациях.

Основные этапы разработки системы с использованием такого подхода следующие:

1. Этап анализа применения

Этот этап направлен на создание модели, независимой от последующей реализации системы. Цель этапа – абстрагироваться от конкретной системы и понять фактические нужды различных заинтересованных сторон. Этап может включать в себя следующие шаги:

- 1.1. Определение заинтересованных сторон, их проблем, потребностей и целей.
- 1.2. Определение возможностей применения системы.
- 1.3. Определение действий по применению системы.
- 1.4. Определение критериев достижения целей и ограничений применения системы.

2. Этап анализа функциональных и нефункциональных потребностей

На этом этапе проводится внешний функциональный анализ, который строится на основе трассировки результатов анализа применения и входных текстовых требований и формализуется в виде их отношения, в целях выявления соответствующих функций, или сервисов системы, необходимых ее пользователям, с учётом нефункциональных ограничений.

Основными действиями, которые совершаются во время анализа потребностей в системе, являются следующие:

- сформировать альтернативные варианты концепций системы для решения проблем пользователя.
- выбрать наиболее приемлемую для заинтересованных сторон концепцию системы с учетом заданных ограничений и критериев достижения целей.
- проведение анализа функциональных и нефункциональных потребностей;
- формализация и утверждение потребностей в системе.

Результатом этого этапа является понимание того, что должна делать система (какие предоставлять сервисы) и каков ее внешний интерфейс.

Также на этом этапе формируются функциональные требования к системе с выбранной концепцией, которые характеризуют функции системы в целом и связывают их с ограничениями,

накладываемыми технологией, ценой, графиком и рисками проекта. Также задаются методы верификации для проверки выполнения каждой функции системы.

3. Этап построения логической архитектуры

На этом этапе, исходя из потребностей, выраженных на двух предыдущих этапах, осуществляется выбор вариантов проектного решения, включающего в себя структурные элементы, называемые логическими компонентами, а также их свойства и связи.

4. Этап построения физической архитектуры

Имеет схожую цель с логическим уровнем, за исключением того, что определяет окончательный вариант архитектуры системы, который должен быть реализован и синтезирован.

На этом этапе функции системы распределяются по физическим компонентам, выполняется необходимая декомпозиция и порождение новых функций и, соответственно, формирование дополнительных функциональных требований и методов верификации. Возникают альтернативные варианты физической архитектуры системы, при помощи которых можно осуществить весь заявленный функционал. На основе различных методов принятия решений осуществляется выбор наилучшей физической архитектуры с учетом заданных ограничений и критериев достижения целей. Таким образом физическая архитектура системы проходит валидацию [6].

5. Этап структурной декомпозиции изделия

На этом этапе, исходя из физической архитектуры, делаются выводы об условиях, которым должен соответствовать каждый из компонентов, для удовлетворения архитектурных ограничений и технических решений, принятых на предыдущих этапах. Этот уровень моделирования также определяет стратегию интеграции, верификации и валидации системы как целого. Результатами этого этапа являются базовые конфигурации системы. Конфигурация системы подразумевает конкретный состав компонентов системы, предназначенный для удовлетворения нужд конкретного заказчика. Этот состав может различаться как по наполнению функционалом, так и по вариантам физической реализации отдельных функций. Установление конфигураций происходит с учетом особенностей применения системы у разных заказчиков, в разных условиях применения.

Для того, чтобы адаптировать представленный выше подход к имеющимся проектам следует выполнить, в том числе, следующие шаги:

- Определить процесс разработки, а именно стратегию моделирования и правила адаптации к ней в соответствии со спецификой предметной области;
- Задать референсную архитектуру для каждого продукта с подходящими архитектурными стилями;
- Формализовать подходящие точки зрения, адаптированные к окружению, продукту и архитектуре;
- Сформулировать специальные инженерные правила, подходящие для того, чтобы реализовать верификацию архитектуры.

В следующих разделах даны предложения по применению некоторых разделов подхода моделирующей системной инженерии к реализации конкретных проектов подсистем АЭС.

2 Моделирование системы на уровне анализа применения

2.1 Определение проблемы, цели и области применения системы технического водоснабжения

Системы технического водоснабжения применяются для защиты установок и агрегатов от перегрева и разрушения под действием высоких температур, охлаждают теплообменники, подшипники насосов и другие вспомогательные агрегаты, путем подачи охлаждающей воды потребителям.

Главной проблемой при неправильной работе системы охлаждения является то, что энергоблок не может набрать установленную мощность (104% мощности от номинальной), что оказывает существенное влияние как на эксплуатационную, так и на экономическую деятельность атомных станций.

С 1 января 2007 г. в Российской Федерации в соответствии с частью 4 статьи 60 Водного кодекса РФ (Кодекс РФ от 03.06.2006 № 74-ФЗ) проектирование проточных систем технического водоснабжения не допускается [7]. Таким образом, в настоящее время возможно использование только оборотной системы охлаждения (использование прудов-охладителей или градирен).

Градирни бывают сухого и мокрого типов, то есть радиаторные и испарительные охлаждающие установки. Испарительные градирни могут быть вентиляторными и башенными. Классификация систем охладений на АЭС представлена на рис.1 [8].



Рис. 1. Классификация систем охладений на АЭС

В соответствии с предыдущим разделом, можно сформулировать главную цель процесса принятия решений при выборе системы охлаждения – это эффективное охлаждение оборотной воды при номинальной и максимальной тепловой нагрузке в самых неблагоприятных условиях окружающей среды.

2.2 Ограничения применения системы

Выбор типа системы охлаждения производится по технологическим расчетам с учетом заданных в проекте расходов воды и количества тепла, отнимаемого от аппаратов и охлаждаемого оборудования, температур охлаждаемой воды и требований к устойчивости охладительного эффекта, метеорологических параметров, инженерногеологических и гидрологических условий площадки строительства, характера застройки окружающей территории, химического состава добавочной и оборотной воды и санитарно-гигиенических требований к нему, технико-экономических показателей процесса строительства этих сооружений.

Область применения оборотных систем водоснабжения представлена в табл.1 [10].

Таблица 1. Область применения оборотных систем

Охладитель	Удельная тепловая нагрузка на единицу площади поверхности охлаждения, кВт/м ²	Разность температур воды после и до охладителя, °С	Разность температур охлажденной воды и атмосферного воздуха по мокрому термометру, °С
Водоёмы-охладители	0,23-0,47	5-10	6-8
Башенная испарительная градирня	70-116	5-15	8-10
Вентиляторная градирня	93-116 и выше	3-20	4-5
«Сухие» градирни	-	5-10	20-35

Технологические расчеты пруда-охладителя для атомных электростанций должны выполняться исходя из среднемесячных гидрологических и метеорологических факторов среднего года с учетом теплоаккумулирующей способности водохранилища, графиков нагрузки и ремонта оборудования. Для

летнего периода среднего и жаркого года обеспеченностью 10% проверяется мощность оборудования, устанавливаются пределы и длительность ограничения мощности по максимальным суточным температурам охлаждающей воды. Полный перечень ограничений и требования к проектированию прудов-охладителей прописаны в ИТС 20-2016.

Проектирование градирен должно производиться в соответствии с СНИП 2.04.02-84. Выбор типа и размера градирни влияет на эффективность работы системы охлаждения и, следовательно, на ее энергопотребление. Каждый тип градирен может иметь разнообразные конструкции отдельных элементов оросительного устройства, отличаться их размерами, расстояниями между ними и выполнен из различных материалов. От того, насколько стабильно и эффективно работает градирня в системе оборотного водоснабжения зависит мера реализации сберегающих технологий в техническом, экономическом и экологическом плане: количество и стоимость потребления и расходования воды, топлива, электроэнергии и сырья. В большинстве случаев, критерии выбора типа градирни формируются заказчиком на основе технологических расчетов.

2.3 Критерии для оценки достижимости целей и выбор концепции из имеющихся альтернативных вариантов

Можно выделить два основных критерия достижения целей:

- 1) работа энергоблока в летний и зимний период на номинальной мощности;
- 2) эффективность охлаждения воды ($\approx 10^\circ\text{C}$).

Для того, чтобы удовлетворить потребности пользователя и достичь целей применения системы технического водоснабжения необходимо выбрать наиболее приемлемую концепцию из альтернативных вариантов.

Использование пруда-охладителя с точки зрения получения более охлажденной технической воды на входе в конденсатор турбины предпочтительнее градирен, так как обеспечивает более глубокий вакуум в конденсаторе и отсюда больший термический КПД энергетической установки. Пруды-охладители сравнительно просты в эксплуатации и исключают необходимость подъема охлаждающей воды на значительную высоту. Существует и ряд недостатков использования прудов-охладителей, таких как:

- сильная зависимость интенсивности охлаждения от времени года и погодных условий;
- снижение качества воды в результате попадания в пруд различных стоков и ее цветения в летний период;
- низкая удельная теплоотдача с поверхности, требующая значительной площади зеркала пруда (затопление значительной территории);
- сокращение объема пруда в результате образования иловых отложений.

В настоящее время на большинстве АЭС с реактором ВВЭР-1000 подача циркуляционной воды происходит из пруда-охладителя, однако дефицит или отсутствием воды для обеспечения работы системы оборотного водоснабжения, определяют необходимость использования градирен.

Градирни надлежит применять в системах оборотного водоснабжения, требующих устойчивого и глубокого охлаждения воды при высоких удельных гидравлических и тепловых нагрузках. Преимущества и недостатки различных типов градирен представлены в табл.2 [10].

Таблица 2. Преимущества и недостатки различных типов градирен

Тип градирни	Вентиляторные градирни	Башенные градирни	Сухие градирни
Преимущества	- гибкость конструкции; -отсутствие обмерзания; -энергоэффективность.	- нет затрат электроэнергии при эксплуатации; - предназначены для больших расходов воды.	- закрытый контур, отсутствие попадания примесей в воду; - возможность работы на кипящей воде.
Недостатки	- необходимы специальных мероприятий для зимнего периода; -возможность загрязнения оборотной воды.	- сложное строительство и ремонт; - малая глубина охлаждения; - необходимы специальных мероприятий для зимнего периода.	- низкая эффективность охлаждения; - дорогая конструкция и материалы.

В зависимости от климатических условий эксплуатации градирни и ее требуемой производительности, подбираются размеры, высота и форма градирен. В зимнее время достаточно широко распространена проблема обмерзания конструктивных элементов градирни. Обмерзание

оросителя и внутренних частей градирни может привести к деформации и обрушению как оросителя, так и частей конструкции градирни. В летний период, из-за высокой температуры окружающего воздуха охлаждающий эффект градирни может быть недостаточным, также немаловажную роль играет ветер и перемещение масс воздуха между градирнями.

Таким образом, выбор системы технического водоснабжения основывается на:

- наличие достаточного объема воды для обеспечения работы системы технического водоснабжения;
- учете группы факторов влияния на работу системы технического водоснабжения (в особенности климатических);
- условиях размещения источника водоснабжения на площадях предприятия;
- технико-экономические показатели системы водоснабжения.

Так же при принятии окончательного решения инвесторы должны оценить срок окупаемости и возможность перемещения оборудования. Необходимо иметь объективную информацию о стоимости послегарантийных эксплуатационных расходов, подтвержденную архивными данными.

3 Существующая практика принятия решений при выборе систем охлаждения

Примером возникновения проблем, связанных с неверным выбором типа охлаждения, может служить 3 энергоблок Ростовской АЭС, использующий в качестве охлаждения воды башенную градирню. Станция находится в районе с континентальным климатом - с жарким и сухим летом, когда температура воздуха достигает 40-42 °С. Поверхность почвы нагревается свыше 60 °С. При проектировании системы технического водоснабжения не был учтен климатический фактор, поэтому в условиях высоких температур, градирни не справляются с охлаждением воды и энергоблок вынужден снижать мощность реактора. По мимо этого, некачественный монтаж внутрикорпусных устройств градирни стал причиной появления значительного количества дефектов, а из-за содержащиеся в воде примеси стали выходить из строя и забиваться устройства для разбрызгивания воды. В результате, 24 апреля 2017 года энергоблок №3 был остановлен на 3 месяца, недополученная выручка из-за простоя составила около 1 миллиардов рублей в месяц, в дополнение к штрафу. Таким образом, с целью снижения температуры охлаждающей воды в пики жарких дневных температур возникла необходимость модернизации системы охлаждения.

Модернизация градирни – сложное техническое мероприятие, что связано с масштабностью объекта модернизации и невозможностью изменения его основных конструктивных элементов, таких как оболочка, водосборный бассейн, так как их модернизация потребует долгосрочного останова блока и больших капиталовложений, которые не окупятся в течение срока эксплуатации энергоблока.

В качестве альтернативных вариантов рассматривались: строительство «сухой» градирни, «нулевой вариант» (отказ от деятельности) и строительство вентиляторной градирни. Основными критериями работы были выбраны: расход охлаждающей воды, температура охлаждаемой и охлажденной воды, температурный перепад.

Работа дополнительной градирни должна происходить только в летний жаркий период, поэтому строительство «сухой» градирни являлось бы экономически нецелесообразным. Отказ от модернизации системы охлаждения («нулевой вариант») приведет к значительному тепловому воздействию на Цимлянское водохранилище. Теплового воздействия нарушает биологическое равновесие водной системы, повышение температуры воды всего на несколько градусов в летнее время, может вызвать 100% гибель рыб и беспозвоночных.

Вентиляторные градирни представляют собой сооружения для охлаждения воды с принудительной подачей воздуха в оросительное пространство с помощью вентиляторов. Работа вентиляторных градирен периодическая. В летний жаркий период часть воды подается на дополнительное охлаждение на вентиляторные градирни. Количество работающих секций вентиляторных градирен определяется исходя из климатических параметров окружающей среды.

Учитывая технические факторы (ограничения по площади), экологические (тепловое загрязнение) и стоимостные факторы (экономическая окупаемость, бюджет проекта) оптимальным вариантом является использование вентиляторных испарительных градирен в качестве дополнительного источника охлаждения воды.

Заключение

Выбор системных решений АЭС в рамках процесса системной инженерии имеет преимущества по сравнению с подходом, ориентированным на непосредственную многокритериальную оценку

альтернатив в конкретный момент времени. Эти преимущества включают, в частности, снижение рисков принятия неправильных решений, упрощение верификации и валидации решений и, как следствие, возможность комплексного удовлетворения потребностей ключевых заинтересованных сторон.

В условиях пролонгированного срока эксплуатации атомных станций управление жизненным циклом систем охлаждения в соответствии с методами системной инженерии становится необходимостью. В том числе, при многокритериальном принятии решений о выборе типа и технологии системы охлаждения должны быть учтены возможности эксплуатации и даже замены технологии, а также всего обеспечивающего оборудования в течение неопределенно длительного срока эксплуатации станции.

Литература

1. Предварительные материалы оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС) эксплуатации энергоблока №3 в 18-месячном топливном цикле на мощности реакторной установки 104% от номинальной с вентиляторными градирнями // Общество с ограниченной ответственностью Научно-производительное объединение «Гидротехпроект», 2019.
2. *Батоврин В.К., Королев А.С.* Использование метода системной инженерии при выборе местоположения АЭС// Материалы восьмой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2015». – М.: Издательство ИПУ РАН, 2015 – С. 168-170.
3. *Королев А.С., Кожевников Д.Е., Реут Д.В.* Особенности анализа компромиссных решений при обращении с отработавшим ядерным топливом в жизненном цикле АЭС// Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2015): труды Восьмой междунар. конфер. в 2 т. / Ин-т проблем упр. им. В.А.Трапезникова Рос. акад. наук. – Т.2: – М.: ИПУ РАН, 2015. – с. 94 – 98.
4. *Jean-Luc Voirin.* Model-based System and Architecture Engineering with the Arcadia Method 1st Edition // ISBN: 9780081017944 ISTE Press – Elsevier. 2017
5. *Pascal Roques.* Systems Architecture Modeling with the Arcadia Method // ISBN: 9780081017920 ISTE Press – Elsevier. 2018
6. *Королев А.С., Бурлаков А.И.* Валидация архитектурных решений при реализации проектов по созданию мобильных комплексов по переработке радиоактивных отходов// Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2019): материалы двенадцатой междунар. конфер. – М.: ИПУ РАН, 2019.– С. 855 – 858.
7. Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 № 74-ФЗ (с изменениями на 24 апреля 2020 года).
8. СТО 1.1.1.02.006.0689-2014 Водопользование на атомных станциях. Классификация охлаждающих систем водоснабжения.
9. *Аксенов В.И., Галкин Ю.А., Заслоновский В.Н., Ничкова И.И.* Промышленное водоснабжение: учебное пособие // Екатеринбург: УрФУ, 2010. 221 с. ISBN 978-5-321-01818-7
10. Пособие по проектированию градирен (к СНиП 2.04.02-84) // Центральный институт типового проектирования, Москва, 1989, 132 с.