

Литвинов Д.Н., Костарев В.С., Ширманов И.А., Щеклеин С.Е., Мицихин А.А.

МАЛОГАБАРИТНАЯ АЭС МАЛОЙ МОЩНОСТИ С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ ДЛЯ АРКТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Аннотация. менее 5% площади земного шара охвачено централизованным сетевым энергоснабжением. В локальных энергоузлах нуждается не только северная территория России, но и северные территории некоторых стран Азии, Гренландии, Южной Америки, Канады, Австралии и Африки. Одним из потенциальных сценариев покрытия энергетического дефицита предлагается использования атомных станций малой мощности. СВБР – один из типов реакторов, обладающих малой мощностью и подходящих под условия размещения в арктической зоне. Для анализа работы атомной станции с реактором СВБР-100 было проведено моделирование различных вариантов его тепловых схем при различных параметрах пара при помощи САПР United Cycle с целью нахождения наиболее оптимального термодинамического цикла.

Ключевые слова: СВБР-100, арктические условия, тепловой расчёт, ЯЭУ, United Cycle.

Abstract. less than 5% of the world's area is covered by centralized grid power supply. Local power centers are needed not only in the northern territory of Russia, but also in the northern territories of some countries of Asia, Greenland, South America, Canada, Australia, and Africa. One of the potential scenarios for covering the energy deficit is the use of low-capacity nuclear power plants. SVBR is one of the types of reactors with low power and suitable for placement in the Arctic zone. To analyze the operation of a nuclear power plant with an SVBR-100 reactor, various variants of its thermal schemes were simulated with various steam parameters using United Cycle CAD systems in order to find the most optimal thermodynamic cycle.

Keywords: SVBR-100, Arctic conditions, nuclear propulsion.

Введение

Рост объёма добычи и переработки полезных ископаемых ограничен дефицитом энергии в регионах, поскольку освоение районов Дальнего Востока России, Крайнего Севера России и Арктики напрямую зависят от качества и бесперебойности подачи энергоснабжения, а площадь этих районов без малого составляет 2/3 от общей территории страны и располагает обширными запасами природных ресурсов.

Однако несмотря на отсутствие централизованного энергоснабжения, в этих регионах присутствуют добывающие и перерабатывающие предприятия. Они вынуждены пользоваться привозным органическим топливом, которое, в связи с трудностью доставки в эти регионы и выработкой своего ресурса генерирующим оборудованием, влечет за собой рост издержек и снижение экономических показателей. [1]

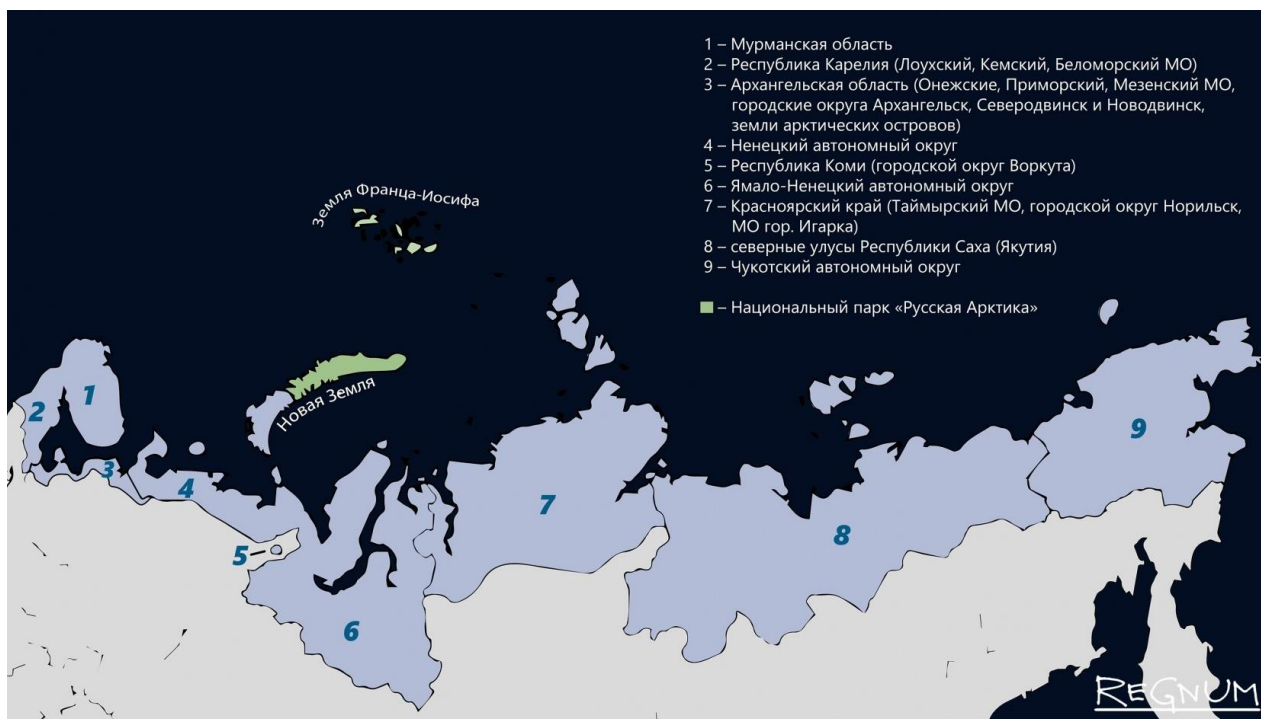


Рисунок 1 – Арктическая зона России.

В настоящее время энергоснабжение большинства Арктических территорий осуществляется дизель-электрическими станциями. На рисунке 2 показана карта размещения и выработки электрической энергии существующими ДЭС по данным [1].

Ежегодный завоз топлива для автономных ДЭС составляет более 1 млн. тонн. Себестоимость произведенной энергии достигает 300-400 руб. за кВт-ч.

Развитие Арктических территорий в настоящее время осуществляется по трем основным причинам:

- освоение природных ресурсов территорий.
- обеспечение надежного функционирования портовой инфраструктуры Северного морского пути.
- обеспечение пограничных и военных объектов, расположенных на Арктических территориях.

Единственным способом удовлетворить потребность данных регионов в электроэнергии является внедрение локальных комплексов на базе АС малой мощности, поскольку природные и климатические условия данных регионов не позволяют повсеместно использовать электрогенерирующие мощности, основанные на преобразовании солнечной, ветровой или приливной энергии [1].

Особенности атомной энергетики в Арктической зоне

России принадлежит 21% всего шельфа Мирового океана. Около 70% его площади перспективны с точки зрения полезных ископаемых, в первую очередь нефти и газа. В апреле 2020 года Правительство Российской Федерации одобрило «Энергетическую стратегию Российской Федерации на период до 2035 года», в которой определено, что освоение углеводородного ресурсного потенциала континентального шельфа арктических морей и северных территорий представляет собой «важнейший геополитический и технологический вызов для нефтегазового комплекса России». [2]

В Арктике сконцентрировано большинство открытых в России уникальных месторождений углеводородов. По имеющимся оценкам суммарные извлекаемые запасы только арктического шельфа составляют не менее 7,3 млрд. тонн нефти и около 55 трлн. куб. метров – газа. [3] Согласно Стратегии, добыча углеводородов на российском шельфе будет играть важную роль в энергетическом балансе России, являясь необходимой для замещения падения добычи на действующих месторождениях за временным горизонтом 2035 года.

Вместе с тем, разработка и освоение шельфовых месторождений в Арктике требует нестандартных технических решений, обусловленных экстремальными климатическими условиями, отсутствием развитых логистических коммуникаций, большими экологическими рисками в условиях хрупкой с резко замедленным самовосстановлением природы Арктики и, главное, тяжёлой ледовой обстановкой. Наличие дрейфующего льда и айсбергов, удалённость месторождений от берега ограничивает возможности проведения буровых и иных морских работ. Решение этой задачи – высокотехнологичный процесс, который требует инновационного развития отраслей и видов деятельности, связанных с созданием средств разведки, поисков, добычи, транспортировки и переработки нефти и газа.

В этих условиях практически единственным решением является создание подводно-подлёдных автоматизированных систем обустройства месторождений, в состав которых должны входить системы разведки, добычные комплексы, установки подготовки продукта добычи к транспорту, компрессорные станции и т.д. Подводно-подлёдные системы обеспечивают решение технических задач освоения месторождений и минимизируют возможные экологические риски.

Базовым условием освоения ресурсного потенциала Арктического шельфа является создание высоконадёжной и безопасной системы энергообеспечения. [4,5] Одной из важнейших составляющих этой системы должна стать воздухонезависимая автономная система энергообеспечения подводно-подлёдных комплексов обустройства месторождений.

Такая система должна отвечать специфическим условиям эксплуатации и требованиям энергопотребителей:

- отсутствие инфраструктуры транспорта энергии;
- рассредоточенность добычных комплексов на больших пространствах;
- наличие протяжённых по времени (вплоть до круглогодичных) ледовых режимов в акватории Северного Ледовитого океана. Для обеспечения круглогодичного энергоснабжения добычного оборудования целесообразно использовать энергоисточники с подводным расположением;
- необходимость устойчивого энергообеспечения с длительностью генерации, равной времени работы потребителей – объектов обустройства месторождения, так как в подводных условиях ремонт и техническое обслуживание затруднены;
- необходимость наличия энергоисточников, независимых от подачи топлива и рабочих сред на протяжении длительного периода;
- необходимость обеспечения высокой автономности и манёвренности энергетических установок, гибко реагирующих на изменение нагрузки;
- крайняя ограниченность численности персонала для осуществления контроля, управления и технического обслуживания;
- необходимость наличия типоряда энергоисточников по генерируемой мощности и возможность мультиплицирования.

По возможности удовлетворения совокупности указанных условий автономные атомные энергоисточники являются весьма перспективными, а в некоторых случаях практически безальтернативными для энергообеспечения освоения Арктического шельфа [4,5].

Потенциальный сценарий использования атомной энергетики в Арктике

В настоящее время Россия занимает передовые позиции в мире в области разработки и создания малых модульных ядерных реакторов в широком диапазоне мощностей – от 100 кВт до 50 МВт (электрических). АЭС по критериям надежности, независимости от топливной составляющей и влиянию на экологию являются наиболее привлекательными энергетическими альтернативами. Существующие проекты АСММ характеризуются высокой степенью адаптивности их технико-экономических и эксплуатационных характеристик для решения проблем развития малой энергетики, из которых стоит выделить возможность подземного и надводного размещения, а также широкий спектр мощностей существующих проектов АСММ: от нескольких единиц до сотен МВт. [6]

Арктика обладает большим потенциалом для использования возобновляемых источников энергии. При этом эксперты считают, что наиболее перспективным альтернативным источником энергии в Арктике является ветер. Однако ветроустановки в Арктике требуют специального арктического низкотемпературного изготовления, это требование к материалам делает арктические ветроагрегаты существенно дороже обычных. Более дешевым и простым в обслуживании и эксплуатации возобновляемым источником являются солнечные установки, однако для полноценной работы таких станций не хватает солнечной энергии. Учитывая все эти факторы, можно констатировать, что «наиболее перспективными возобновляемыми источниками энергии Арктике являются энергетические комплексы с разным набором технологий: ядерная энергетика, ветер и солнце». [7]

Требования к ЯЭУ для Арктического использования:

- 1) Минимальный уровень капитальных затрат
- 2) Максимальный уровень безопасности
- 3) Возможность поэтапного наращивания мощности
- 4) Возможность теплофикационного использования
- 5) Минимальный расход технической воды (независимость от источника водоснабжения)
- 6) Максимальная продолжительность работы без перегрузки топлива
- 7) Возможно низкое обогащение топлива

Атомная станция с реактором на быстрых нейтронах со свинцово-висмутовым теплоносителем (СВБР)

СВБР – энергетические ядерных реакторы, имеющие малую мощность, принцип работы которых основан на быстрых нейтронах, в которых используется свинцово-висмутовый теплоноситель (СВТ).

Как было сказано выше, Россия имеет уникальный опыт проектировки, создание и эксплуатации реакторных установок на быстрых нейтронах. На сегодняшний день в России разрабатываются реакторные установки типа СВБР с малыми мощностями (10-40 и 100-400 МВт). Принцип энергоблока – модульный. Наилучшим образом на данный момент прорабатывается проект СВБР-100. [8]

Реакторы имеют высокий уровень пассивной безопасности и внутренней самозащищённости [9] благодаря:

- использованию свинцово-висмутовый теплоноситель;
- сплав свинца и висмута химически инертен по отношению к газам воздуха и к воде, при использовании данного сплава не выделяется водород, это, в

- свою очередь, полностью исключает риски возникновения химических взрывов;
- имеет способность удерживать продукты деления (J, Cs, и др. за исключением инертных газов), что уменьшает возможность и тяжесть утечек радиоактивных материалов в окружающую среду;
 - высокая температура кипения (~1670 °С) (температура плавления свинцово-висмутового теплоносителя – 124°С) и большая теплоёмкость СВТ исключает аварии, возникающие из-за кризиса теплообмена (уровень естественной циркуляции теплоносителя достаточен для расхолаживания реакторной установки из любого исходного состояния);
 - использованию интегральной компоновки, при которой активная зона, оборудование первого контура и модуль испарителя размещены в едином прочном корпусе реакторного моноблока с полным исключением арматуры и трубопроводов свинцово-висмутового теплоносителя. Тракт теплоносителя организован таким образом, что исключается попадание воды-пара в активную зону при течи теплообменной поверхности модуля испарителя в корпусе МБР;
 - низкое давление в первом контуре исключает утечки из первого во второй контур. Обеспечивает низкий запас потенциальной энергии в первом контуре, уменьшая возможность и тяжесть механических повреждений при авариях;
 - нейтронным характеристикам быстрого реактора;
 - низкий оперативный запас реактивности (меньше доли запаздывающих нейтронов) исключает возможность разгона реактора на мгновенных нейтронах при несанкционированном извлечении любого рабочего стержня;
 - малое значение отрицательного температурного коэффициента реактивности;
 - небольшой запас реактивности на выгорание;
 - отсутствие эффектов отравления.

Благодаря развитым свойствам внутренней самозащищенности существенно, в сравнении с традиционными реакторными установками, уменьшены количество и сложность систем безопасности, при этом, функции безопасности возложены, в основном, на системы нормальной эксплуатации; основные компоненты реакторного моноблока и РУ выполнены в виде отдельных модулей, при этом обеспечена возможность их замены и ремонта; оборудование реакторной установки проектируется исходя из требования обеспечения его

сейсмостойкости и работы ОПЭБ в маневренном режиме с суточным изменением мощности в пределах 50-100% со скоростью 0,5-2% $N_{\text{ном}}/\text{мин.}$ [10]

Реакторы также могут использовать ядерное топливо различных видов (на оксиде урана, смешанных нитридах, смешанных оксидах) и работать в замкнутом ядерном топливном цикле.

Таблица 1 – Основные характеристики реакторов СВБР-10 и СВБР-100.

Наименование параметра	СВБР-10	СВБР-100
Мощность РУ тепловая, МВт	43,3	280
Мощность РУ электрическая (брутто), МВт	12	101,5
Давление генерируемого пара, МПа	4,2 (перегретый пар 410°C)	9,5 (насыщенный пар 307°C или перегретый пар 400°C)
Температура СВТ, вх/вых, °C	320 / 480	320 / 482
Топливо: тип, среднее обогащение по U-235, %	UO ₂ 18,7	UO ₂ 16,5
Кампания активной зоны, тыс. эфф.ч	135	53
Интервал времени между перегрузками, лет	15-20	7-8

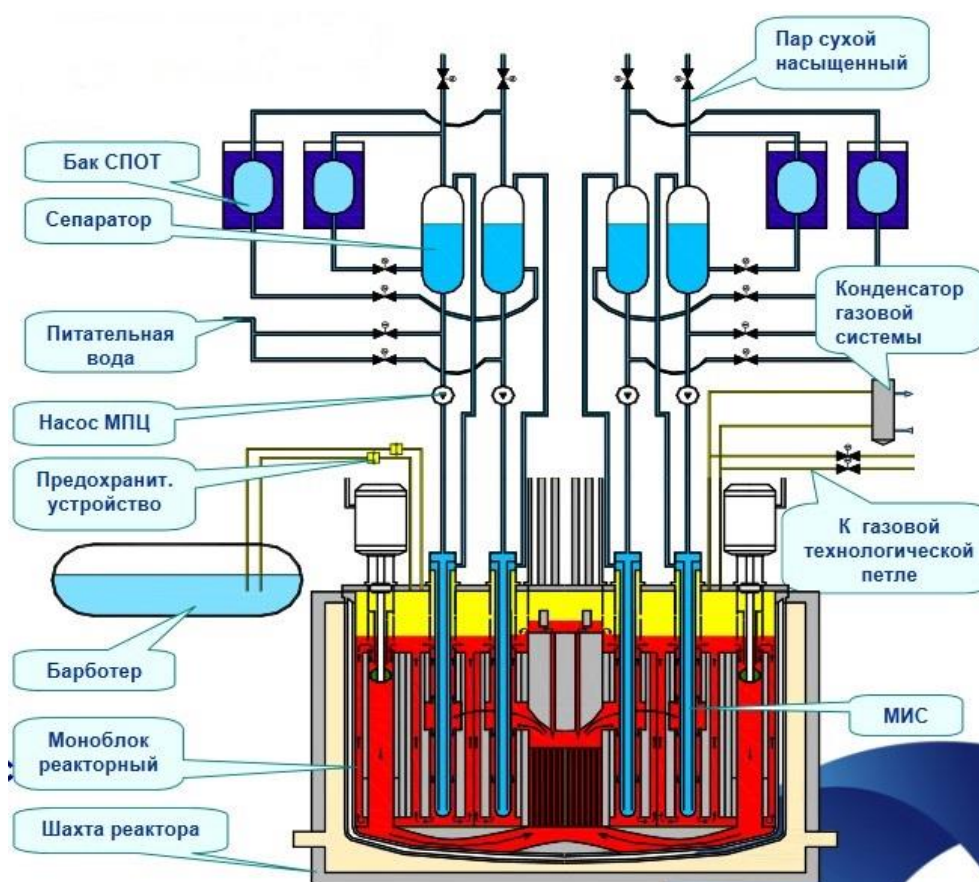


Рисунок 2 – Принципиальная схема реакторной установки СВБР-100

Принципиальная схема реактора предусматривает:

- тракт теплоносителя первого контура, сформированный внутри корпуса реакторного моноблока без трубопроводов и арматуры;
- четыре петли второго контура с вертикальными сепараторами насосами многократной принудительной циркуляции (МПЦ);
- газовую систему для поддержания инертной атмосферы над уровнем теплоносителя первого контур;
- система пассивного отвода тепла (СПОТ);
- 2 барботера для приема парогазовой смеси из МБР при межконтурной течи модуля испарителя.

Использование свинцово-висмутового теплоносителя

Свинцово-висмутовый теплоноситель имеет ряд преимуществ. Во-первых, по сравнению с жидкометаллическими теплоносителями на основе натрия, используемыми в реакторах типа БН, такими как жидкий натрий или натриево-кальциевый сплав, СВТ имеют значительно более высокие точки кипения, из чего следует, что эксплуатация реактора не имеет риска закипания теплоносителя при гораздо более высоких температурах. Следовательно, улучшается термический КПД, а также это потенциально может позволить производство водорода с помощью термохимических процессов.

Во-вторых, свинцово-висмутовый теплоноситель химически инертен и не вступает в реакцию с водой или газами воздуха в отличие от тех же натрия и натриево-кальциевого сплава, которые самовоспламеняются на воздухе и взрывоопасно реагируют с водой. Из этого следует, что реакторы, в которых используется СВТ, в отличие от конструкций с натриевым охлаждением, не нуждаются в промежуточном контуре теплоносителя, что значительно снижает капитальные вложения на установку.

В-третьих, поскольку в состав сплава СВТ входит свинец и висмут, он, сам по себе, является отличной защитой от гамма-излучения, однако является «прозрачным» для нейтронов. В сравнении натрий образует мощный гамма-излучатель натрия-24, чей период полураспада составляет 15 часов, после интенсивного нейтронного излучения, что требует большой радиационной защиты для первичного контура охлаждения, что также удорожает капиталозатраты на реакторную установку.

В-четвертых, использование свинцово-висмутового теплоносителя не требует создания давления в реакторе даже при высоких температурах ввиду высокой температуры кипения сплава. Исходя из этого, можно сделать вывод, что использование СВТ позволяет создавать пассивно безопасные конструкции.

Несмотря на преимущества, для свинцово-висмутового теплоносителя имеются некоторые недостатки, а точнее – ограничения, которые должны соблюдаться при использовании данного теплоносителя.

Во-первых, СВТ является более коррозионным для стали, чем натрий, что устанавливает верхний предел скорости потока теплоносителя через реактор из соображений безопасности.

Во-вторых, более высокие температуры плавления свинцово-висмутового теплоносителя могут быть более серьезной проблемой в случае затвердевание хладагента, когда реактор работает при более низких температурах. Следовательно, нельзя допускать работу реактора в условиях температур ниже температуры замерзания сплава свинец-висмут.

Наконец, в-третьих, при нейтронном излучении висмут-209, основной стабильный изотоп висмута, присутствующий в СВТ, подвергается нейтронному захвату и последующему бета-распаду, образуя полоний-210, мощный альфа-излучатель. Присутствие радиоактивного полония в теплоносителе потребует специальных мер предосторожности для контроля альфа-загрязнения во время перегрузки реактора и обращения с компонентами, контактирующими со свинцово-висмутовым теплоносителем.

Тепловой расчёт принципиальной схемы АЭС с РУ СВБР-100

Данные расчёты проведены в специальной программе United Cycle (UC). За основу расчётов были взяты схемы-аналоги существующих решений.

Пакет UC предназначен для решения задач определения наилучших структуры и состава оборудования теплоэнергетического объекта и расчета стационарных эксплуатационных режимов работы.

Целью проектных или поверочных тепловых расчетов является получение технико-экономических показателей работы турбоустановок, необходимых для выбора наилучших параметров, профиля и структуры тепловой схемы.

Пакет UC строится на алгоритме, в котором решение системы нелинейных уравнений ищется в едином итерационном процессе без разбиения исходного графа на подграфы. Этот алгоритм учитывает специфику изменения параметров в графе, соответствующем технологическому процессу, и обеспечивает решение системы уравнений во всем диапазоне эксплуатационных нагрузок не только отдельного энергоблока, но и всей электростанции в целом.

Экологическая оценка РУ СВБР-100

Рассмотрим воздействие реакторной установки СВБР-100 на окружающую среду и персонал как реактора на быстрых нейтронах.

Реакторы на быстрых нейтронах обладают рядом преимуществ [11]:

- возможность работать на низких (близких к атмосферному) давлениях в реакторе, что значительно снижает риск выброса радиации;
- высокая тепловая эффективность и надежность оборудования реакторного контура (отсутствие коррозии и отложений на поверхности ТВЭЛов);
- возможность получения высоких температур теплоносителя, что увеличивает термодинамическую эффективность АЭС;
- минимальный начальный запас реактивности, который практически исключает возможность возникновения ядерно-опасных событий;
- минимальный объём технологических отходов (10-20 м³/год);
- радиационная нагрузка на персонал в 10-100 раз меньше, биоэкологическое воздействие – отсутствует;
- наиболее эффективное использование ядерного топлива (выгорание в 2–2,5 раза) среди всех типов АЭС;
- возможность увеличения производства (воспроизводства) ядерного топлива. [12]

Говоря конкретно о реакторной установке СВБР-100, необходимо отметить, что загрязнение окружающей среды стоками, содержащими радионуклиды, при эксплуатации реактора отсутствует. Сбросные регенерационные воды установки очистки конденсата (в том числе и случайные протечки, и проливы химрастворов), содержащие катионы металлов и анионы кислотных остатков, свободную серную кислоту и едкий натр, направляются в баки-нейтрализаторы химводоочистки. Очищенные воды используются в оборотном цикле РУ СВБР-100. Водопотребление при оборотной системе охлаждения предназначено для подпитки с целью компенсации потерь воды в охладительных устройствах на испарение и унос, а также на продувку системы, величина которой зависит от качества воды в источнике водоснабжения и от принятых методов обработки исходной воды.

Достаточно жесткие пределы соблюдаются для газообразных выбросов. В основу проектирования вентиляции АЭС с реакторной установкой СВБР-100 заложены следующие принципиальные решения:

- отдельная вентиляция помещений зоны контролируемого доступа (ЗКД);
- отдельная вентиляция помещений зоны свободного доступа (ЗСД);
- организация направленного движения воздуха только в сторону более «грязных» помещений;
- установка герметичных дверей в технологических помещениях зоны строгого режима с радиоактивными средами;

- создание нормальных условий для ремонтного персонала при проекте производства работ и перегрузочных работах;
- в случае удаления воздуха перед выбросом в атмосферу проходит очистку от радиоактивных аэрозолей на аэрозольных фильтрах, благодаря чему обеспечивается низкий уровень радиоактивных аэрозолей в газообразном вентиляционном выбросе. [13]

Нерадиоактивные отходы подлежат вывозу на полигон промышленных отходов.

Результаты и обсуждение

Исходя из результатов проведённых расчётов можно заметить, что при одном и том же расходе топлива в проекте реакторной установки на перегретом паре получаем в ~1,5 раза больше электрической мощности, то есть электроэнергии. Следовательно, проект реакторной установки на перегретом паре является более привлекательным.

Из рассмотренных вариантов наиболее полно поставленной задаче отвечает реактор, работающий с паровой турбиной на перегретом паре, поскольку КПД ПТУ по производству электроэнергии у него выше в 1,5 раза, электрическая мощность его превышает электрическую мощность реактора, работающего с паровой турбиной на насыщенном паре, также в 1,5 раза, при этом удельный расход тепла, передаваемого технической воде, меньше в 1,7 раза, следовательно, работающий с паровой турбиной на перегретом паре реактор при максимальной мощности имеет минимальный расход воды. Отсюда следует, что лучшим в условиях Арктического размещения является реактор, работающий с паровой турбиной на перегретом паре.

В таблице 3 представлены параметры пара в расчётных точках паротурбинного цикла, а также коэффициент полезного действия ступеней турбины.

Таблица 2 – Сравнение термодинамических характеристик тепловых схем АЭС с РУ СВБР-100 на насыщенном и перегретом паре

Параметр	Насыщенный пар	Перегретый пар
Тепловая мощность реактора, МВт	300	300
Расход, кг/с	111	111
Давление, бар	31.79	218
Температура, °С	284	530
КПД электрогенератора, %	98.5	98.5
Внутренняя мощность ПТУ, МВт	64.79	98.26
Внутренняя мощность ПТУ (брутто), МВт	63.82	96.79
Удельный расход теплоты на выработанную ПТУ, кДж/кВт*ч	13592	8886
КПД ПТУ по производству э/э, %	26.49	40.51
Затраты мощности на собственные нужды (абс), МВт	1.07	3.2
Затраты мощности на собственные нужды (отн), %	1.67	3.31
Электрическая мощность ПТУ (нетто), МВт	62.75	93.58
Удельный расход теплоты на отпущенную ПТУ, кДж/кВт*ч	13824	9190
КПД ПТУ по отпуску, %	26.04	39.17

Таблица 3 – Полученные параметры пара на расчётных точках тепловых схем паротурбинного контура

№	Перегретый пар				Насыщенный пар			
	Р, кг/см ²	Т, °С	h, Ккал/кг	η, %	Р, кг/см ²	Т, °С	h, Ккал/кг	η, %
1	222,9	530	791		32	284	704	
2	57,2	328	715	87	14,7	202	670	85,8
3	36,1	273	693	85	6,98	168	662	23,6
4	16,5	202	659	87	2,78	130	626	90,3
5					2,68	129	626	
6	16,5	226	683		2,68	157	664	
7	10,2	180	663	87	1	99	627	89
8	0,06	36	536	70	0,06	36	571	58,6

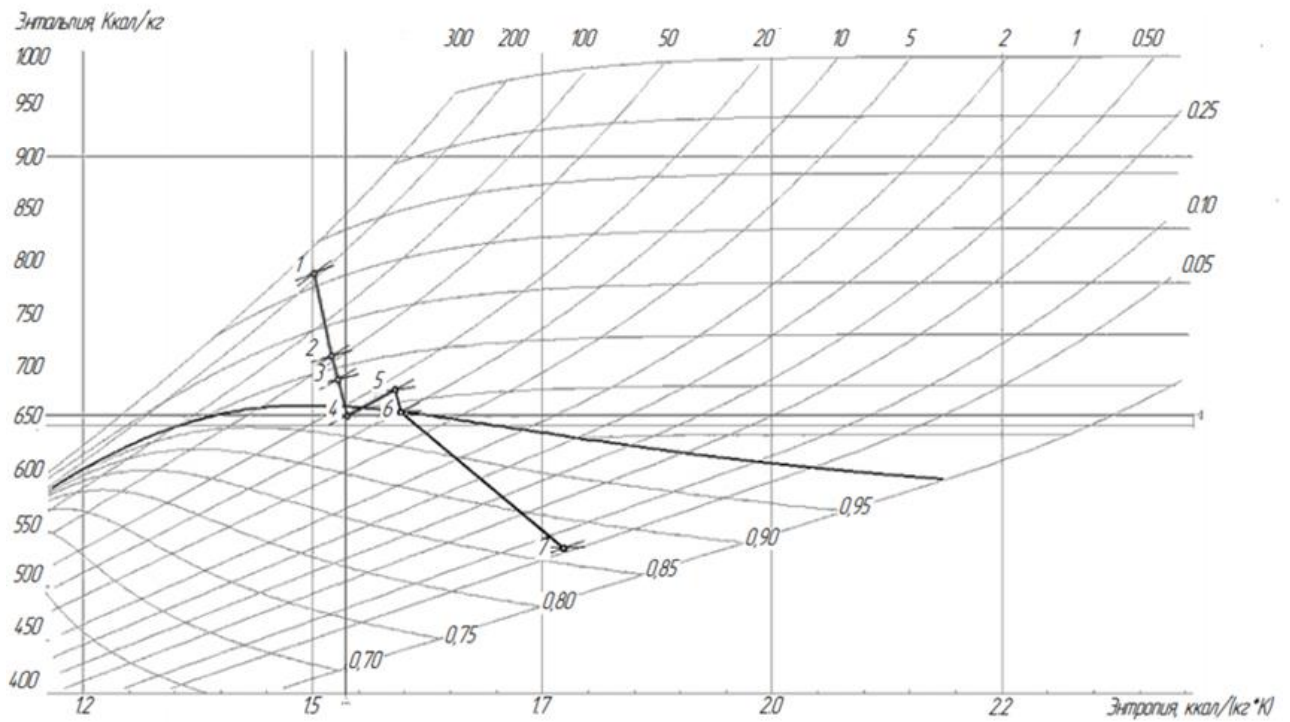


Рисунок 3 – Термодинамическая диаграмма процессов работы АЭС на перегретом паре

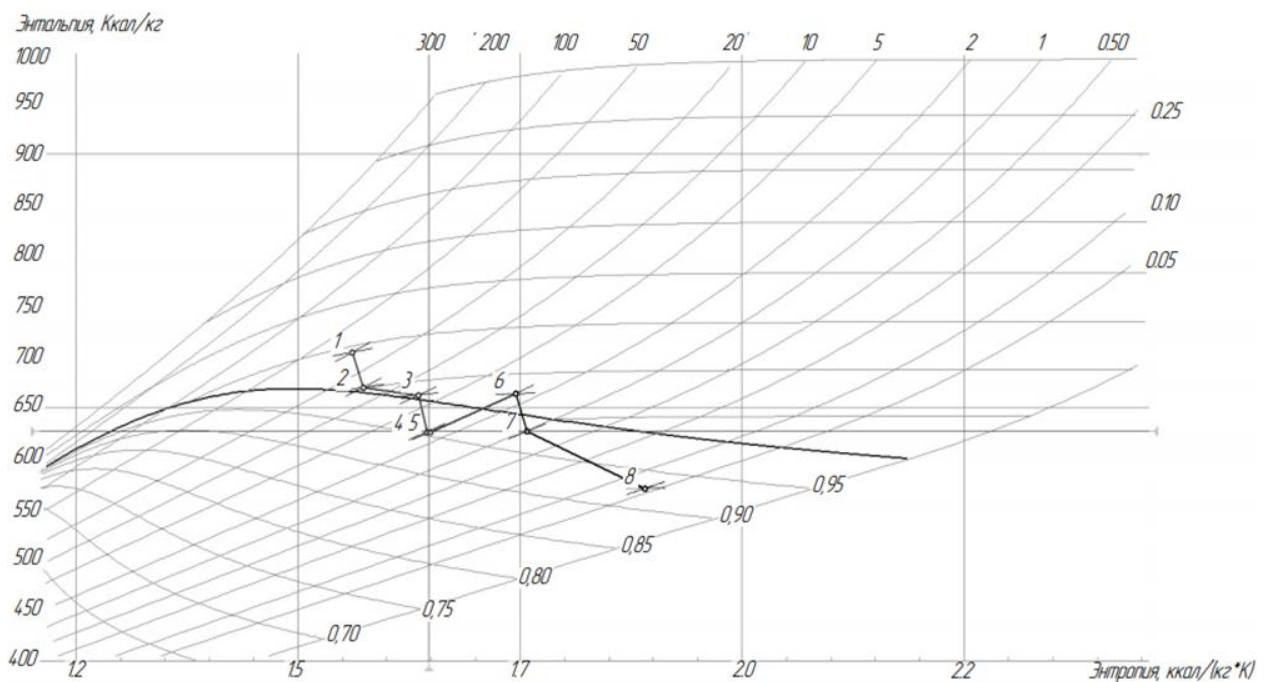


Рисунок 4 – Термодинамическая диаграмма процессов работы АЭС на насыщения

Заключение

В данной работе приведены варианты расчётов принципиальных тепловых схем энергоблока АЭС с реактором СВБР-100 (с насыщенным и перегретым паром).

Особое внимание было уделено реактору СВБР-100, его техническим характеристикам, режимам работы, преимуществам перед реакторами, в которых используются другие виды теплоносителя, также рассмотрели его с точки зрения экологии и безопасности. В работе также была представлена принципиальная схема, компоновка и продольный разрез СВБР-100.

Были сформулированы специфические требования к ядерной энергоустановке для использования в Арктическом регионе.

По результатам проделанной работы можно сделать вывод о том, что РУ СВБР – результат аккумуляции опыта проектировки и эксплуатации ядерных энергоустановок. Реакторная установка СВБР-100 с перегретым паром наиболее полно удовлетворяет требованиям АЭС для размещения в Арктическом регионе.

Библиографический список

1. Пименов А. О. Энергообеспечение в Арктике / А. О. Пименов, Д. Г. Куликов, Е. Н. Гольцов, Г. И. Гречко // *Neftegaz.RU*. – 2018. – № 1. – С. 24–29.
2. Ковальчук М. В. Инновационная атомная энергетика в преддверии шельфовых проектов в Арктике / М. В. Ковальчук, О. С. Нарайкин, В. С. Устинов [и др.] // *Neftegaz.RU*. – 2020. – № 5. – С. 26–30.
3. Кобылкин Д. Н. Ресурсы арктического шельфа – это наш стратегический запас / Д. Н. Кобылкин // *Энергетическая политика : общ.-деловой науч. журн.* – URL: <https://energypolicy.ru/resursy-arkticheskogo-shelfa-eto-nash/business/2019/22/14/> (дата обращения: 06.06.2021).
4. Ковальчук М. В. Арктический вектор энергетике России / М. В. Ковальчук // *XXII Александровские чтения, 15 февраля 2016 года : материалы конф., посвящ. 113-й годовщине со дня рождения акад. А. П. Александрова.* – Москва, 2016. – С. 37–42.
5. Ковальчук М. В. Арктический вектор энергетике России / М. В. Ковальчук // *Природа.* – 2016. – № 9. – С. 24–31.
6. Смоленцев Д. О. Развитие энергетике Арктики: проблемы и возможности малой генерации / Д. О. Смоленцев // *Арктика: экология и экономика.* – 2015. – № 3 (7). – С. 22–29.
7. Альтернативная энергия Арктики. – URL: <http://arctic-centre.com/ru/analitika/item/197-alternativnayaenergiya-arktiki> (дата обращения 25.12.2020).
8. СВБР // *Википедия : свобод. энцикл.* – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/СВБР> (дата обращения: 20.12.2020).
9. Климов Н. Н. Свинцово-Висмутовые быстрые реакторы для атомных станций малой и средней мощности / Н. Н. Климов // *Международный форум «АТОМЭКСПО 2009» 26–28 мая 2009 г.* – Москва, 2009. – С. 33.
10. Реакторная установка СВБР-100 для модульных атомных станций малой и средней мощности / Н. Н. Климов, В. В. Джангобегов, В. С. Степанов [и др.]. – URL:

<http://www.gidropress.podolsk.ru/files/publication/publication2013/documents/245.pdf> (дата обращения: 20.12.2020).

11. Ecological features of fast reactor nuclear power plants (NPPs) at all stages of their life cycle / O. Tashlykov, S. Shcheklein, A. Seseikin [et al.] // WIT Transactions on Ecology and the Environment. – 2014. – Vol. 190 : 1st International Conference on Energy Production and Management in the 21st Century: The Quest for Sustainable Energy (Ekaterinburg, 23–25 Apr 2014). – P. 907–918.
12. Ecological foresight in the nuclear power of XXI century / O. Tashlykov, S. Shcheklein, O. Smyshlaeva, Y. Nosov. – DOI 10.2495/EQ-V1-N2-133-140 // International Journal of Hydrogen Energy. – 2016. – Vol. 1, Iss. 2. – P. 133–140.
13. Оценка воздействия на окружающую среду при сооружении опытно-промышленного энергоблока с реакторной установкой на быстрых нейтронах со свинцово-висмутовым теплоносителем в Ульяновской области. – Ульяновск, 2014. –URL: http://svbr.org/assets/files/OVOS/OVOS_soo_kn6.pdf (дата обращения: 20.12.2020).