

УДК 621.039.576

## Об атомном теплоснабжении

СКВОРЦОВ С. А., СИДОРЕНКО В. А.

За 25 лет со времени пуска первой АЭС появились новые пути развития ядерной энергетики, связанные с разработкой новых конструкций и типов ядерных реакторов, а также применением их в новых целях. Одно из таких назначений — атомное теплоснабжение, которое начало развиваться совсем недавно. Речь идет о низкотемпературном тепле для промышленности и жилых массивов. Выработка тепла высокой температуры для отдельных отраслей промышленности предъявляет особые требования к ядерным установкам и в данной статье не рассматривается.

Статистика показывает, что затраты энергоресурсов на низкотемпературное теплоснабжение примерно в полтора раза превышают затраты на выработку электроэнергии, причем в значительной степени для выработки тепла используются мелкие малоэффективные установки, требующие наиболее ценные виды топлива — нефтяное и газовое. Замена их атомной энергией может иметь большое значение в народном хозяйстве.

Предполагается, что на ближайшую перспективу потребление тепла в СССР достигнет 6,0 млрд. Гкал/год [1]. В качестве теплоносителей в системе теплоснабжения используются вода и пар, причем вода — для передачи тепла как к промышленным установкам (68 %), так и в жилищно-коммунальном секторе (32 %). В промышленном теплоснабжении примерно 60 % приходится на технологический пар. Большинство потребителей пара расходует насыщенный пар давлением ~1,3 МПа. На месте выработки должен производиться пар, перегретый на 10—15 °С. Меньшая часть потребителей нуждается в паре более высокого давления.

Можно представить себе три способа централизованного теплоснабжения от атомного энергоисточника. По эффективности использования топлива наиболее экономична атомная ТЭЦ (АТЭЦ) — станция для комбинированной выработки электроэнергии и тепла в одном агрегате. Термодинамическая эффективность ее определяется тем, что часть или вся электроэнергия вырабатывается на тепловом потреблении, т. е. без затрат тепла на конденсацию пара. Если электроэнергия производится турбиной с противодавлением (турбиной Т), из которой пар направляется к потребителям

тепла, то коэффициент использования первичной энергии близок к 100%. Эта схема, однако, не очень удобна практически, так как жестко связывает потребление тепла и электричества, в то время как необходимое соотношение между ними меняется в течение года. Поэтому чаще используется турбина ТК, из которой для нужд теплоснабжения отбирается лишь часть пара, остальная же часть проходит через конденсатор. Коэффициент использования первичного тепла тем выше, чем больше тепла расходуется на теплоснабжение, чем ниже параметры отбираемого пара и чем выше начальные параметры пара, поступающего в турбину [2].

Однако следует иметь в виду, что в АТЭЦ трудно рассчитывать на получение тех же величин коэффициента использования, что и в схемах, где применяются органическое топливо и пар высоких параметров. Начальные параметры пара в ядерной энергетике низкие. В экономически оправданных случаях — это насыщенный пар давлением до 6—7 МПа. Что же касается параметров отбираемого пара, то они оказываются более высокими, чем в энергетике на органическом топливе, за счет устройства дополнительных последовательных контуров, цель которых — воспрепятствовать проникновению радиоактивных продуктов из реактора в сеть потребителя. Все это приводит к тому, что перепад энтальпии пара, идущего на теплоснабжение, оказывается невысоким, в то время как его количество определяется потребностями в тепле и является заданным при заданной мощности энергетической установки. Таким образом, АТЭЦ характеризуется сравнительно низкой выработкой электроэнергии на тепловом потреблении и поэтому невысоким коэффициентом использования первичного тепла. Вместе с тем АТЭЦ требует разработки теплофикационной турбины, рассчитанной на низкие начальные параметры пара, конструирование которой связано с некоторыми трудностями. При эксплуатации турбины жестко связываются выработка электроэнергии и количество пара, отбираемого для теплоснабжения. Это вносит определенные неудобства и ограничивает устанавливаемые режимы. Следовательно, наиболее экономичный способ комбинированной выработки электроэнергии и тепла в ядерных установках связан с неко-

торыми дополнительными трудностями и вместе с тем термодинамически менее эффективен, чем использование ТЭЦ на органическом топливе.

Второй способ обеспечения теплоснабжения на базе ядерного реактора — комбинированное использование ядерного реактора для получения пара конденсационного паротурбинного цикла и для теплоснабжения. В этом случае теплообменник, служащий для производства пара низкого давления и горячей воды, получает тепло от первичного теплоносителя. Если в такой схеме использовать кипящий реактор, дополнительный теплообменник в реакторной установке приведет к понижению средней температуры теплоносителя и паросодержания в нем на выходе из активной зоны. Уменьшение средней температуры воды в зоне на 20—25 °С и снижение выходного паросодержания на 5% могут вызвать увеличение глубины выгорания топлива, достаточно чувствительное, чтобы дать ошеломляющую экономическую выгоду. Достоинства такой схемы должны быть проанализированы в конкретных проектных решениях.

Третий способ — организация атомных котельных, служащих только для производства пара низкого давления и горячей воды. В этом случае электроэнергия не вырабатывается. Потребности в ней должны покрываться за счет работы конденсационных станций (в частности, атомных), к. п. д. которых ниже, чем к. п. д. АТЭЦ. Однако применение атомных котельных благодаря их конструкционным особенностям даст некоторые преимущества по сравнению с АТЭЦ. Важное обстоятельство — большая чувствительность ядерного реактора как источника тепла к уровню параметров используемого теплоносителя. Снижение параметров ведет к упрощению и удешевлению конструкции, увеличению ее надежности, повышению эффективности использования ядерного топлива. Для теплоснабжения как такового в реакторах с водяным охлаждением не требуется поддержания высокого давления. Достаточно обеспечить давление порядка 1,5—2 МПа, а иногда и ниже. В реакторах корпусного типа это позволяет сильно облегчить сооружение корпуса. Существенно уменьшаются масса корпуса и толщина его стенок, что упрощает изготовление. В таком случае может не потребоваться помощь специальных машиностроительных заводов. Тепловая мощность реактора для котельной не превышает 1000 МВт, следовательно, можно использовать корпус заводского изготовления. Однако доступно и монтажное выполнение, так как требуется значительно меньшая, чем для корпусов энергетических реакторов, толщина стенки. При этом можно исключить термообработку сварных швов.

Поскольку корпуса для энергетических реакторов и котельных могут производиться на разных заводах, ядерная электроэнергетика и атомное теп-

лоснабжение могут развиваться, не препятствуя друг другу.

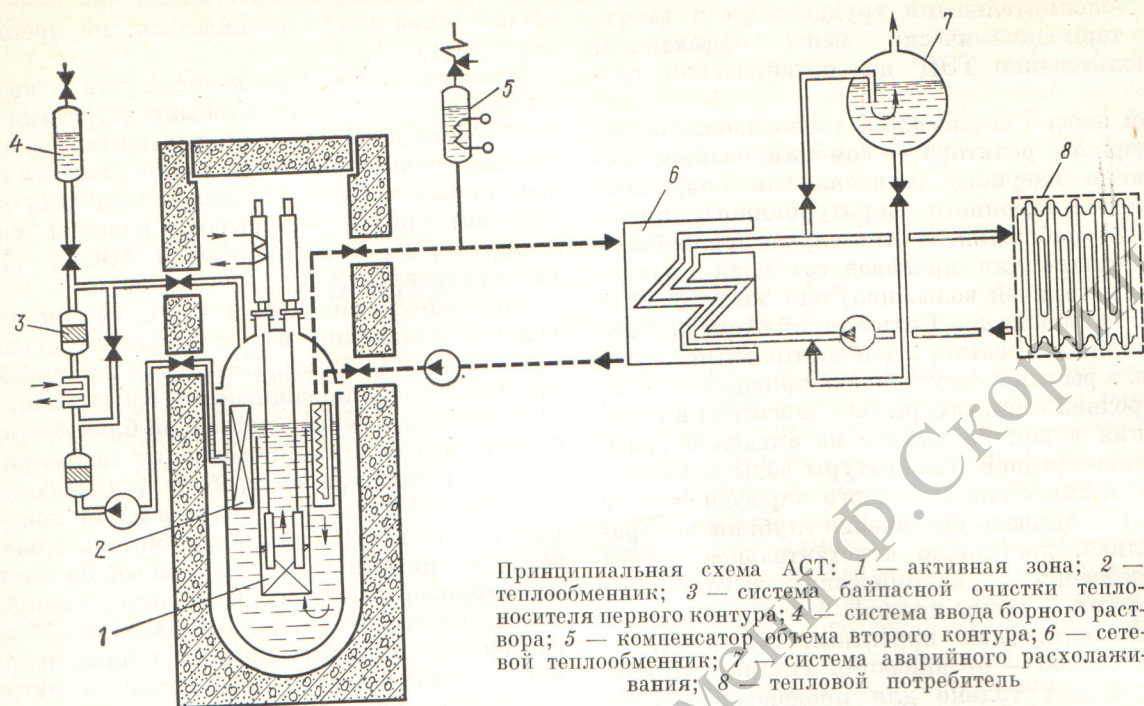
Низкое давление в реакторной установке котельной позволяет с минимальными затратами осуществить ряд дополнительных защитных мер, снижающих опасность утечки радиоактивных продуктов, а компактность — надежно защитить от внешних воздействий — взрывов, падения самолета и других, на которые обычно АЭС и АТЭЦ не рассчитываются.

При сооружении АЭС и АТЭЦ обычно ставится условие отдаления их от крупных населенных пунктов на 20—40 км. Котельная же, снабженная дополнительными защитными средствами, может сооружаться в непосредственной близости к потребителю, что требует минимальных затрат на теплоотрасту. Котельная не требует большого расхода технической воды, необходимого для конденсаторов АЭС и АТЭЦ, связанного обычно с большими затруднениями в условиях теплоснабжения крупных городов. Поэтому котельные, сооружаемые вблизи потребителей, в комбинации с АЭС, располагаемыми на достаточном расстоянии от потребителей электроэнергии, но вблизи от источников водоснабжения, могут оказаться во многих случаях наилучшим решением вопроса удовлетворения потребителей и теплом, и электроэнергией. Наконец, котельная требует минимальной площадки для застройки по сравнению с АТЭЦ, что чрезвычайно существенно для крупных городов, где свободные площади крайне дефицитны. Все отмеченные достоинства атомных котельных делают их весьма перспективными для теплоснабжения крупных городов.

В городах теплоснабжение обычно ограничивается подачей потребителям горячей воды для бытовых нужд. Максимальная требуемая мощность реакторных установок для атомных котельных составляет, по оценкам, 1000 МВт; более употребительной может быть мощность 500 МВт или, возможно, даже ниже.

Рассматривая роль атомных котельных в топливно-энергетическом балансе народного хозяйства, важно учитывать, что при замещении котельных на дефицитных видах органического топлива (газе, мазуте) атомными использование ядерного топлива оказывается более эффективным, чем при замещении обычных конденсационных электростанций атомными из-за более низкого к. п. д. АЭС.

Необходимый уровень безопасности — важный фактор при сопоставлении атомных котельных и АТЭЦ. Как уже отмечалось, источник теплоснабжения должен располагаться возможно ближе к потребителю, так как сооружение теплоотрасту (паровых или водяных) требует существенных затрат. Кроме того, передача тепла на расстояние связана с потерей потенциала теплоносителя. Близость расположения повышает требования к радиационной защите реактора, причем в качестве воз-



Принципиальная схема АСТ: 1 — активная зона; 2 — теплообменник; 3 — система байпасной очистки теплоносителя первого контура; 4 — система ввода борного раствора; 5 — компенсатор объема второго контура; 6 — сетевой теплообменник; 7 — система аварийного расхолаживания; 8 — тепловой потребитель

можных нарушений защиты рассматриваются такие, которые не учитываются при значительном расстоянии атомного источника от потребителя. К ним относятся крайне маловероятные повреждения оборудования на самой станции и внешние воздействия (падение самолета, близкие взрывы).

За максимальную проектную аварию на станции теплоснабжения принимается не разрыв трубопровода максимального диаметра, а повреждение стенки корпуса реактора. Предотвратить от последствий такой аварии может, например, дополнительный страховочный корпус реактора. Это позволит организовать процесс так, что расплавления твэлов из-за потери теплоносителя не произойдет.

Недопустимо проникновение в контур потребителя радиоактивных продуктов из первичного реакторного контура. Это может быть достигнуто путем устройства промежуточного контура. Давление в последовательных контурах выбирается так, чтобы при образовании неплотностей происходила протечка теплоносителя из тепловой сети в дополнительные контуры, а не в обратном направлении.

Описанные мероприятия легче осуществить в условиях атомных котельных, чем АТЭЦ, вследствие более высоких параметров теплоносителя и больших габаритов последней.

На рисунке приведена принципиальная схема атомной станции теплоснабжения на базе атомной котельной с кипящим реактором. Аналогичные схемы защиты от проникновения радиоактивных продуктов в сеть потребителя должны быть осуществлены и при паровом теплоснабжении. В каче-

стве запирающей жидкости в промежуточном контуре может использоваться вода повышенного давления (несколько выше давления теплоотдающей среды). Может применяться и другая запирающая жидкость, например органический теплоноситель. В этом случае его давление должно быть ниже давления пара, подаваемого потребителю, чтобы протечки направлялись из сетевого контура в промежуточный. Дополнительный последовательный контур требует организации передачи тепла, что связано с устройством дополнительного теплообменника. Поверхность его нагрева можно уменьшить за счет увеличения температуры греющего теплоносителя, т. е. путем затрат температурного потенциала сократить затраты металла на поверхность нагрева. При использовании этой схемы в атомной котельной можно достичь умеренных затрат металла на изготовление поверхностей теплообмена за счет повышения давления в реакторе. Очевидно, что оптимальное давление должно соответствовать минимальным расходам на сооружение реактора и промежуточного контура. Применение такой схемы на АТЭЦ для получения технологического пара осложняется, поскольку промежуточный контур должен включаться в местах отбора пара. Трудности связаны с относительно малым диапазоном температуры среды на пути передачи тепла, что приводит к чересчур большой теплопередающей поверхности теплообменников. Повышение же температурного перепада ведет к росту температуры отбираемого пара и соответственно к снижению экономичности АТЭЦ.

В системе атомного теплоснабжения могут применяться любые реакторы. Для эффективного использования в первую очередь их сооружение должно быть дешевым. Желательно, чтобы при использовании реакторов на АТЭС можно было вырабатывать пар высоких параметров, так как это позволит получить наиболее высокий коэффициент использования первичного тепла. Однако обеспечение высоких параметров должно обязательно сочетаться с достаточно экономным расходом урана. Использование, например, для получения высоких параметров в качестве покрытий твэлов нержавеющей стали, интенсивно поглощающей нейтроны, явно невыгодно. В этом случае полученная благодаря термодинамическим преимуществам высокая эффективность использования тепла будет утрачиваться вследствие перерасхода урана из-за бесполезного поглощения нейтронов оболочками твэлов. С экономической точки зрения необходимо, чтобы дешевизна сооружения реактора сочеталась с малыми приведенными затратами на выработку электроэнергии и тепла.

Как правило, экономические расчеты показывают, что при получении пара высоких параметров на АЭС с водяным теплоносителем электроэнергия оказывается пока дорогой и не достигаются экономические выгоды. Исходя из этого, можно считать, что до освоения достаточно дешевых высокотемпературных реакторов наиболее приемлем для теплофикации легководный корпусной реактор.

В атомных котельных, как представляется, наиболее простая тепловая схема обеспечивается при использовании кипящего реактора, поэтому реактор именно такого типа может быть рекомендован для применения.

Выбор наиболее целесообразной схемы атомного теплоснабжения и конструкции атомного источника, наиболее подходящего для этого, — дело ближайшего будущего. Следует лишь иметь в виду, что проторенные пути, считающиеся, безусловно, оптимальными для теплотехники органического топлива, могут оказаться не самыми выгодными при переходе на использование атомной энергии, подобно тому как начальные параметры насыщенного пара в турбинах, обслуживающих атомные станции, считаются пока наиболее целесообразными, в то время как на станциях с органическим топливом разумными принимаются лишь параметры перегретого пара. Решающим при выборе будет сопоставление экономических показателей различных схем теплоснабжения, базирующихся на реальных реакторных конструкциях. При этом очень важно наиболее полно учитывать все особенности применяемых технических решений, а также хозяйственную конъюнктуру районов теплоснабжения. Само собой разумеется, что многое зависит от развития ядерной энергетики в целом и апробации тех или иных конструкций, которые будут осуществляться на практике.

Сегодня для бытового теплоснабжения наилучшие перспективы можно ожидать от внедрения низкотемпературного водо-водяного кипящего реактора, основные решения по которому приводятся ниже. В активной зоне такого реактора производится минимальное количество пара. Массовое расходное паросодержание на выходе из зоны 0,6—0,7%; по мере продвижения теплоносителя через тяговый участок количество пара увеличивается за счет изменения нивелирной высоты потока. На выходе из тягового участка паросодержание теплоносителя составляет уже около 1%. Наличие пара в потоке теплоносителя позволяет организовать движение паро-водяной смеси за счет естественной циркуляции при всех режимах работы установки. Давление теплоносителя 1,6—2,0 МПа, поэтому толщина стенки корпуса реактора может быть менее 40 мм. Такой корпус можно изготовить на неспециализированных заводах атомного машиностроения или даже на месте монтажа. Используется интегральная компоновка реакторной установки. В пространстве между внутривреакторными устройствами и стенкой корпуса располагается промежуточный водяной теплообменник, служащий для вынесения тепла из реактора в сетевой теплообменник, который снабжает потребителя горячей водой. Промежуточный теплообменник является приемником всего тепла, генерируемого в активной зоне, и рассчитан на конденсацию образующегося в ней пара и охлаждение теплоносителя реактора до начальной температуры. Чтобы радиоактивные вещества из реактора не попадали в сеть потребителя, давление в промежуточном контуре поддерживается на 0,4 МПа ниже, чем в сети. Циркуляция воды в промежуточном контуре принудительная. Корпус реактора установлен во втором, страховочном корпусе, поэтому даже в предельно маловероятном случае появления трещин в основном корпусе вода из него вытекает в зазор между корпусами. Зазор рассчитывается так, что заполнение его реакторной водой не приводит к оголению активной зоны и перегоранию твэлов вследствие обезвоживания. Страховочный корпус может быть как металлическим, так и бетонным и рассчитан на выдерживание полного давления, которое поддерживается в основном корпусе реактора. При эксплуатации считается обязательным контроль целостности стенок основного корпуса, чтобы появившийся дефект мог быть своевременно устранен.

Тепловая схема реактора спроектирована так, чтобы любые неполадки в ней не приводили к выбросу больших количеств реакторной воды. Этому способствует отсутствие трубопроводов крупного диаметра.

Реактор снабжен механическими органами регулирования и аварийной защиты. Активная зона рассчитана на длительность кампании 6—7 лет с частичными перегрузками топлива один раз

в два года. Обогащение загружаемого при перегрузках топлива составляет 1,6—1,8%, глубина выгорания 14—15 кг·сут/т топлива. Пониженная энергонапряженность твэлов — еще один важный фактор, обеспечивающий более высокую надежность и безопасность такого ядерного реактора как источника энергии для системы централизованного теплоснабжения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атомная наука и техника в СССР. Юбилейный сборник к 60-летию СССР. М., Атомиздат, 1977.
2. Литвин А. М. Техническая термодинамика. М., Госэнергоиздат, 1974.

Поступила в Редакцию 17.01.86

УДК 621.039.58'68

## Вопросы обеспечения безопасности атомных станций теплоснабжения

ЕГОРОВ В. В., КОВАЛЕВИЧ О. М., КУУЛЬ В. С., ЛУЗАНОВА Л. М., МАЛАМУД В. А., МИТЕНКОВ Ф. М., НИКИПОРЕЦ Ю. Г., ПАВЛЕНКО В. И., САМОЙЛОВ О. Б., СИДОРЕНКО В. А., СОКОЛОВ И. Н., ЦАРЕВ Н. М.

**Схемные и конструктивные решения.** Размещение атомных станций теплоснабжения (АСТ) вблизи крупных городов обуславливает дополнительные требования по безопасности, соображения о необходимости которых были высказаны в работе [1]. Конструктивные и схемные решения реакторной установки и станции в целом должны учитывать эти требования. Одним из главных вопросов при создании АСТ является выбор типа реакторной установки. Исследования, проводившиеся в нашей стране [2] и за рубежом [3—5], показали, что водородные реакторы достаточно полно соответствуют требованиям, предъявляемым к атомным источникам теплоснабжения, чему способствует накопленный опыт проектирования, изготовления и эксплуатации реакторов с водяным теплоносителем.

В работе [2] для АСТ был предложен низкотемпературный кипящий корпусной водо-водяной реактор. Низкое давление теплоносителя в основном контуре (примерно на порядок ниже, чем для современных энергетических водяных реакторов) значительно уменьшает потенциальную энергию теплоносителя, предопределяет спокойный характер аварийных процессов, связанных с разгерметизацией. Низкая температура теплоносителя и умеренная теплонапряженность активной зоны повышают эксплуатационную надежность твэлов. Интегральная компоновка оборудования позволяет избежать применения трубопроводов большого диаметра, являющихся потенциальным источником крупных аварий при разгерметизации основного контура.

Естественная циркуляция теплоносителя основного контура существенно повышает надежность охлаждения активной зоны, исключает аварийные ситуации, связанные с отказом главных циркуляционных насосов. Высокая эксплуатационная надежность и простота управления корпусного кипящего реактора с естественной циркуляцией подтверждена многолетним опытом эксплуатации реакторной установки ВК-50 [6].

Основной корпус реактора размещается (с небольшим зазором) внутри страховочного корпуса либо

герметичной железобетонной шахты, рассчитанных на давление теплоносителя основного контура, что полностью исключает перегрев при аварийных ситуациях. Характерное для реакторов этого типа наличие в корпусе значительного объема воды с температурой ниже насыщения является дополнительным положительным фактором ввиду малой скорости изменения параметров основного контура и возможности использовать суммарную теплоемкость теплоносителя для отвода остаточного тепловыделения реактора.

Для удовлетворения требований по безопасности могут быть использованы некоторые схемные решения, в частности:

применение трехконтурной схемы с промежуточным разделительным контуром, давление теплоносителя в котором меньше, чем в тепловой сети, что исключает возможность утечки радиоактивных продуктов из реактора к потребителю через систему теплоснабжения;

использование многопетлевой схемы промежуточного контура, которая обеспечивает высокую степень защищенности реактора от аварий при отказе систем, ответственных за отвод тепла от реактора;

организация работы системы аварийного расхолаживания реактора на пассивном принципе действия с естественной циркуляцией теплоносителя во всех трех контурах;

отказ от установки предохранительных клапанов на основном контуре, что позволяет исключить опасность утечки значительного количества радиоактивных продуктов при неплотности предохранительного клапана.

Последнее схемное решение может быть реализовано благодаря конструктивным особенностям системы теплоотвода от реактора. Вследствие жесткой тепловой связи основного и промежуточного контура основной контур защищен от переопрессовки с помощью импульсных предохранительных устройств, установленных на промежуточном контуре. Срабатывание клапана на одной из петель промежуточного контура интенсифицирует тепло-