1. **Введение**

**1.1 Особенности тепловых схем.**

Принципиальная тепловая схема является основной расчет­ной и технологической схемой энергетической установки любого типа: электростанции, судовой или космической. Выбор типа, составление принципиальной тепловой схемы и ее расчет пред­ставляют собой один из важнейших этапов проектирования энер­гетической установки, на этом этапе определяется ее тепловая экономичность. В основе оценки тепловой экономичности лежит термодинамическая эффективность преобразования тепловой энергии, характеризуемая КПД термодинамического цикла — *термическим КПД.* Реализуемые в ЯЭУ термодинамические ци­клы и начальные параметры рабочего тела в значительной мере зависят от конструкции и типа реактора и от физических свойств используемого теплоносителя.

Большое количество типов реакторов, разнообразие приме­няемых теплоносителей в сочетании с разнообразием функцио­нального назначения действующих и проектируемых ЯЭУ, ре­жимов их работы и условий эксплуатации, также в сильной сте­пени влияющих на состав оборудования и особенности тепловых схем, привело к тому, что применительно к ЯЭУ предложено большое количество различных тепловых схем. Наибольшая оп­ределенность в принципах построения тепловых схем и выборе состава оборудования достигнута при разработке тепловых схем АЭС. Это объясняется прежде всего тем, что сразу же после постройки и успешной эксплуатации первых АЭС вопросам те­пловой экономичности придавалось одно из первостепенных зна­чений. Кроме того, для АЭС, особенно для двухконтурных, мож­но было в полной мере использовать имеющийся опыт разра­ботки тепловых схем паротурбинных электростанций на органи­ческом топливе.

Тепловые схемы действующих и проектируемых в настоящее время судовых ЯЭУ главным образом подчинены условиям обеспечения различных режимов работы, необходимых для вы­полнения требований по ходовым качествам и маневренности судна, надежности и безопасности работы установки (резерви­рование основного и вспомогательного оборудования, наличие аварийных систем, защитных устройств и т. п.). Стремление к компактности установки, позволяющей уменьшить массу и объем биологической защиты ЯЭУ и противоударной защиты корпуса судна, также сильно повлияло на выбор состава обо­рудования энергоустановок. В результате в ущерб тепловой экономичности тепловые схемы действующих судовых ЯЭУ бо­лее просты и в термодинамическом отношении менее совершен­ны но сравнению со схемами АЭС. Вместе с тем общность про­цессов, протекающих в реакторах, механизмах и устройствах судовых и стационарных энергетических установок, позволяет считать, что опыт работы стационарных энергетических устано­вок может быть с успехом использован в дальнейшем при создании судовых ЯЭУ.

Тепловые схемы космических энергетических установок на ядерном топливе еще в большей степени подчинены особым условиям работы в космосе. Специфика работы в космосе — отсутствие атмосферы и невесомость - влечет за собой необходи­мость сброса теплоты только излучением и особый подход к организации теплообмена (особенно в испарителях и конденсато­рах). Эти особенности в сочетании с требованием минимума массы космической ЯЭУ приводят при проектировании к опти­мизации ее по массе в целом (с учетом массы холодильника-излучателя). В связи с этим, как правило, приходится отходить от оптимума по коэффициенту полезного использования тепловой энергии. Если в наземных электростанциях для повышения тепловой экономичности идут на усложнение циклов и схем пре­образования энергии, то в космических установках, наоборот, приходится избегать каких-либо усложнений, связанных с вве­дением дополнительного оборудования и коммуникаций.

Изложенное позволяет считать целесообразным в методиче­ском отношении рассмотреть вопросы, относящиеся к содержа­нию, расчету и обоснованию принципиальных тепловых схем ЯЭУ на примерах тепловых схем АЭС.

**1.2 Состав и назначение принципиально тепловой схемы АЭС.**

Схему преобразования и использования тепловой энергии рабочего тела в энергетической установке (в том числе в АЭС) называют тепловой. На ней показаны оборудование, посредст­вом которого осуществляются тепловые процессы, и объединение этого оборудования в единую установку линиями трубопрово­дов. Различают принципиальную и полную (развернутую) теп­ловые схемы.

*Принципиальная тепловая схема* включает только основное оборудование — реактор, парогенератор, турбину, основные и вспомогательные теплообменные аппараты (конденсаторы, ре­генеративные подогреватели, деаэраторы, испарители, холодиль­ники, питательные насосы и компрессоры и т. п.). Состав этого оборудования определяется прежде всего типом термодинами­ческого цикла и его параметрами, видом теплоносителя или ра­бочего тела и целевым назначением установки. На принципи­альной тепловой схеме для достижения большей четкости не показываются оборудование, агрегаты и целые системы, имею­щие одинаковое функциональное назначение и работающие па­раллельно. По тем же соображениям на схему не наносятся дублирующие линии трубопроводов, переключающие и вспомо­гательные соединительные трубопроводы и арматура.

В отличие от принципиальной тепловой схемы на *полной (развернутой) тепловой схеме* приводятся все оборудование, все агрегаты и системы — рабочие, резервные, вспомогательные. Трубопроводы изображаются со всеми параллельными линия­ми, обводами и соединениями. Наносится основная и дублиру­ющая арматура. Чертеж полной тепловой схемы сопровождает­ся спецификацией, соединяющей данные о типе, числе и техни­ческих характеристиках оборудования. Полная тепловая схема и ее спецификация характеризуют уровень надежности и тех­нического совершенства АЭС. Полная тепловая схема разраба­тывается после составления и расчета принципиальной тепловой схемы, после выбора основного оборудования, решения вопро­сов о его резервировании и других вопросов, связанных с обес­печением необходимого уровня надежности.

Такая классификация тепловых схем является условной, при­нятой при рассмотрении тепловых схем электростанций. Встре­чаются схемы, которые по количеству и составу упрощений за­нимают промежуточное положение. Например, для принципи­альных тепловых схем судовых ЯЭУ обязателен показ резерв­ного оборудования (главного и вспомогательного), принципа построения систем, обеспечивающих работу основного оборудо­вания, в том числе систем охлаждения, смазки, водоподготовки и др.

Принципиальная тепловая схема станции составляется на основании планируемых для нее электрических и тепловых нагрузок с учетом необходимости обеспечения требуемого уровня надежности и экономичности отпуска электроэнергии и теплоты потребителям. При составлении принципиальной тепловой схе­мы АЭС выбирают:

1. тип электростанции;
2. тип реактора, его мощность и параметры теплоносителя;
3. вид цикла (паротурбинный, газотурбинный, комбинированный и т. п.) и его начальные параметры;
4. применительно к паротурбинному циклу: тип, количество, и следовательно, и единичную мощность турбин, схему регене­ративного подогрева воды; расположение и тип устройств, обес­печивающих допустимую конечную влажность пара; тип и место включения деаэраторов питательной воды и питательных на­сосов; тип привода питательных насосов (электрический и паро­турбинный) и схему включения приводной турбины; способ и схему подготовки добавочной воды (химическое или термиче­ское обессоливание); при термической подготовке добавочной воды определяют место и схему включения испарителей в систе­му регенеративного подогрева; схему отпуска теплоты на собственные нужды и внешним потребителям; схемы и оборудование для использования теплоты различных вспомогательных потоков пара и воды (теплоты непрерывной продувки, выпара из деаэ­раторов, пара из эжекторов и уплотнений турбин и т. п.);
5. применительно к газотурбинному циклу: тип и мощность турбин и компрессоров, степень регенерации, количество ступе­ней сжатия и промежуточного охлаждения газа, схему и обору­дование поддержания давления в контуре, схему регулирования мощности для работы на частичных нагрузках, схему очистки газа и др.;
6. применительно к комбинированным циклам: параметры соответствующих ступеней комбинированной схемы (газопаровой, натрий-водяной и т. п.), мощность основного оборудования главной ступени, соответствующее оборудование и схемы для паротурбинной (п. 4) и газотурбинной (п. 5) частей.

Таким образом, можно видеть, что принципиальная тепловая станции состоит из ряда схем, выбор которых и взаимная увязка в единое целое и составляют задачу начального этапа разработки тепловой схемы станции. Составление принципиаль­ной тепловой схемы может быть проведено лишь на основании предварительных проработок, сопоставления и анализа различ­ных вариантов, оптимизационных и технико-экономических рас­четов с учетом опыта эксплуатации действующих станций и ре­зультатов научных исследований.

Следующий этап разработки принципиальной тепловой схе­мы— её расчет, а именно: определение расходов и параметров рабочего тела и теплоносителя в любой точке схемы. На основа­нии полученных данных уточняют технические характеристики основного оборудования и устанавливают технические условия, по которым могут быть выбраны или запроектированы элемен­ты вспомогательного оборудования. С учетом расчетных данных определяют показатели тепловой экономичности станции и её элементов. Такими показателями тепловой экономичности АЭС и ее элементов, равно как и показателями тепловой экономично­сти любой другой энергоустановки, предназначенной для преоб­разования тепловой энергии (или посредством тепловой энер­гии) в другие виды (механическую, электрическую и т. п.), яв­ляются КПД и удельные расходы теплоты. Определить эти ха­рактеристики можно из уравнений теплового баланса

Qзатр= Qисп + Qпот, (1.1)

или в относительном виде

1 = η + qпот, (1.2)

где Qзатр, Qисп, Qпот — количества затраченной, полезно исполь­зованной и потерянной теплоты соответственно; η = Qисп / Qзатр — КПД; qпот = Qпот / Qзатр — относительные потери теплоты, где учтена и теплота, отводимая в «холодном источ­нике» при низшей температуре термодинамического цикла.

Равенство (1.2) показывает, что оценку тепловой экономич­ности можно проводить как по КПД, так и по относительным потерям. Это имеет большое практическое значение, поскольку часто бывает проще и точнее определить относительные поте­ри или их изменение, чем КПД. Для станций и энергоустано­вок, вырабатывающих один вид энергии, КПД можно опреде­лить также из выражения

(1.3)

где — внутренний абсолютный КПД цикла; — *эффектив­ные КПД,* характеризующие неизбежные потери, вносимые каждым из n элементов станции или энергетической установки. Для простых циклов можно выразить через — *термический КПД* и — относительный внутренний КПД:

 (1.4)

При комбинированной выработке энергии (например, элек­троэнергии и теплоты для отопления зданий) на АЭС или в какой-либо другой энергетической установке двухцелевого назначения возникают трудности при оценке тепловой эконо­мичности такого комбинированного энергопроизводства. Эти трудности обусловлены тем, что на станции вырабатываются одновременно качественно неравноценные виды энергии — электрическая и тепловая. Эта неравноценность не учитывается таким показателем, как КПД. Кроме того, при комбиниро­ванном производстве энергии за счет общих затрат ядерного топлива, когда вырабатываемая энергия разных видов на­правляется разным потребителям, всегда возникает необходи­мость раздельного определения показателей экономичности производства этих видов энергии. Поэтому для характеристики степени совершенства комбинированного энергопроизводства принято использовать не один, а два и больше показателей.

В последнее время для термодинамического анализа и оп­тимизации тепловых циклов и схем энергоустановок все чаще применяется эксергетический метод анализа. В этом методе теп­ловая экономичность характеризуется *эксергетическим КПД* , который в отличие от термического и внутреннего КПД количест­венно учитывает неравноценность различных видов энергии, в частности механической (работы) и теплоты. Это позволяет использовать эксергетический КПД как единственный показа­тель при оценке энергетической эффективности комбинирован­ного производства энергии.

1. **Тепловая схема реактора типа РБМК (РБМК – 1000)**
	1. **Основные сведения о ректорах типа РБМК (РБМК – 1000).**

Реактор РБМК-1000 тепловой мощностью 3200 МВт представляет собой систему, в которой в качестве замедлителя используется графит, в качестве теплоносителя — легкая вода, в качестве топлива — двуокись урана. В целом реактор состоит из набора вертикальных каналов, вставленных в цилиндрические отверстия графитовых колонн, и верхней и нижней защитных плит. Легкий цилиндрический корпус (кожух) замыкает полость графитовой кладки. Кладка состоит из собранных в колонны графитовых блоков квадратного сечения с цилиндрическими отверстиями по оси. Кладка опирается на нижнюю плиту, которая передает вес реактора на бетонную шахту. Топливные каналы и каналы регулирующих стержней проходят через нижние и верхние металлоконструкции. Приводы регулирующих стержней расположены над активной зоной в районе верхней защитной конструкции реакторного зала.

Топливо в виде таблеток помещено в оболочку из сплава циркония и ниобия (Э-100). Твэлы длиной 3644 мм по восемнадцать штук собраны в виде цилиндрического пучка в тепловыделяющую сборку. Две сборки, расположенные одна над другой, собранные на одном центральном стержне, образуют тепловыделяющую кассету, которая устанавливается в каждый топливный канал. Перегрузка топлива осуществляется на мощности с помощью разгрузочно-загрузочной машины, расположенной в центральном зале. Один-два топливных канала могут быть перегружены каждый день.

Приблизительно 95% энергии, выделяющейся в результате реакции деления, прямо передается теплоносителю. Около 5% мощности реактора выделяется в графите от замедления нейтронов и поглощения гамма-квантов. Для снижения термического сопротивления и предотвращения окисления графита полость кладки заполнена циркулирующей смесью газов гелия и азота, которая служит одновременно и для контроля целостности каналов по изменению влажности и температуры газа. Под нижней и над верхней плитами имеются пространства для разводки труб водяных коммуникаций от раздаточных коллекторов к каждому каналу и труб пароводяных коммуникаций от каждого канала к барабан-сепараторам.

Разгрузочно-загрузочная машина после удаления соответствующего участка настила и вывода на координаты канала, состыковывается с его головкой, выравнивает свое давление с давлением канала, разуплотняет канал, удаляет выгоревшую топливную кассету и ставит на ее место свежую, уплотняет канал, отстыковывается и транспортирует отработавшую кассету в бассейн выдержки. Пока машина соединена с полостью топливного канала, малый поток чистой воды поступает из нее через теплогидравлическое уплотнение в канал, создавая «барьер» для предотвращения проникновения в полость машины горячей радиоактивной воды из активной зоны.

Помимо топливных каналов в активной зоне РБМК имеется 179 каналов СУЗ. Стержни СУЗ предназначены для регулирования радиального поля энерговыделения (PC), автоматического регулирования мощности (АР), быстрой остановки реактора (A3) и регулирования высотного поля энерговыделения (УСП), причем стержни УСП длиной 3050 мм выводятся из активной зоны вниз, а все остальные длиной 5120 мм - вверх.

Система управления и защиты реактора основана на перемещении 191 — 211 твердых стержней-поглотителей в специально выделенных каналах, охлаждаемых водой автономного контура. Система обеспечивает:

* автоматическое поддержание заданного уровня мощности;
* быстрое снижение мощности стержнями автоматических регуляторов и стержнями ручных регуляторов по сигналам отказа отдельных единиц оборудования;
* аварийное прекращение цепной реакции стержнями аварийной защиты по сигналам опасных отклонений параметров блока или в случае отказов основного оборудования;
* компенсацию изменений реактивности при разогреве и выходе на мощность;
* регулирование распределения энерговыделения по объему активной зоны.
	1. **Основные характеристики реактора РБМК – 1000.**

|  |  |
| --- | --- |
| Мощность реактора, кВт |  |
| тепловая | 3,2 х 106 |
| Электрическая | 1 х 106 |
| Расход теплоносителя через реактор, т/ч | 37500 |
| Паропроизводительность, т/ч | 5600 |
| Давление пара в сепараторе, кГс/см2 | 70 |
| Давление в напорных коллекторах, кГс/см2 | 86,0 |
| Среднее массовое паросодержание на выходе из реактора, % | 14,5 |
| Температура теплоносителя, °С: |  |
| на входе в активную зону | 270 |
| на выходе из активной зоны | 284 |
| Максимальная мощность канала, кВт | 3000 |
| Расход теплоносителя, в канале максимальной мощности, т/ч | 29,4 |
| Максимальное паросодержание на выходе из канала, % | 20,1 |
| Минимальный запас до критической мощности | 1,04 |
| Высота активной зоны, мм | 7000 |
| Диаметр активной зоны, мм | 11800 |
| Шаг технологической решетки, мм | 250 х 250 |
| Количество топливных каналов (1 очередь/2 очередь) | 1693/1661 |
| Обогащение топлива, % | 2,4 |
| Средняя глубина выгорания извлекаемого топлива, МВт сут/кг | 22,5 |
| Максимальная температура графита в отдельных точках, °С | 700 |
| Максимальная температура поверхности циркониевой трубы технологического канала, °С | 325 |

К основным достоинствам канальных реакторах относили отсутствие трудоёмкого и дорогостоящего корпуса, возможность наращивания мощности путем пристройки новых графитовых блоков без изменения конструкций других узлов, а также возможность замены без остановки реактора отработавших тепловыделяющих элементов на новые.

Наряду с достоинствами реакторы РБМК имеют некоторые недостатки. Поскольку в реакторах РБМК охлаждающая вода непосредственно из активной зоны попадает в парогенератор и в турбину, то их называют одноконтурными. А в одноконтурных реакторах не исключена вероятность попадания радиоактивных веществ в воду, турбогенератор, а также другие объекты станции при аварийной разгерметизации трубопроводов. Кроме того, для реакторов РБМК ввиду большей длины активной зоны, большого объема графитовой кладки и некоторых других факторов характерна неравномерность распределения нейтронов по высоте и объему, а, следовательно, неравномерность тепловыделения. Это в совокупности с особенностями изменения замедляющих свойств паровоздушной смеси в процессе работы приводит к некоторой неустойчивости работы реакторов.

### Поперечный разрез реакторной установки

###

1. Активная зона
2. Трубопроводы водяных коммуникаций
3. Нижняя биологическая защита
4. Раздаточный коллектор
5. Боковая биологическая защита
6. Барабан-сепаратор
7. Трубы пароводяных коммуникаций
8. Верхняя биологическая защита
9. Разгрузочно-загрузочная машина
10. Съёмный плитный настил
11. Тракты топливных каналов
12. Опускные каналы
13. Напорный коллектор
14. Всасывающий коллектор
15. Главный циркуляционный насос
	1. **Тепловая схема реактора типа РБМК (РБМК – 1000)**

Упрощенная тепловая схема АЭС содержит все наиболее важные элементы, соответствующие реальным машинам и агрегатам эксплуатируемые в составе реакторной установки. Упрощения этой схемы заключаются в отсутствии управляющих элементов и элементов, связанных с уплотнением турбоагрегата.

**Некоторые понятия и определения.**

На тепловой схеме изображаются устройства, в которых происходит изменение параметров (температуры, энтальпии, давления, влажности и т.д.) рабочего тела, в нашем случае, пара и воды. Довольно много оборудования включено в схему параллельно по ходу движения рабочего тела, (например насосы ГЦН). Так как параметры рабочего тела в одинаковых устройствах, включенных параллельно, изменяются на одну и ту же величину, то на тепловой схеме такие устройства обозначаются одним элементом.

Например:

Давление при прохождении жидкости через насос изменяется на величину напора создаваемого насосом. Если вода поступает по параллельным трубопроводам в три работающих ГЦН, то давление на входе в каждый насос одинаково и равно предположим P1, а на выходе из насосов давление

P2 = P1 +  P

Где,  P – напор, создаваемый насосом.

Если все насосы работают в нормальном режиме, то их напор  P одинаков и давление после всех насосов P2 одинаково. На схеме в этом случае изображается один значок насоса, в котором происходит изменение давления теплоносителя от P1 до P2.

При описании тепловой схемы и технологического оборудования часто используются перечисленные ниже понятия и определения. Они являются общепринятыми и широко используемыми.

**Пар отбора***– пар, отводимый из турбины на различных ступенях расширения, для использования его тепловой энергии в различных целя, например, для регенеративного подогрева.*

**Дренаж** – *вода, полученная при конденсации пара обора в различных устройствах (кроме конденсатора) например в подогреватели низкого давления.*

**Основной конденсат***– вода, полученная в конденсаторе, за счет конденсации расширившегося в турбине пара (после совершения работы), и сливе в него (конденсатор) дренажей.*

**Острый пар***– пар после барабана сепаратора, направляемый, в частности, в сепаратор пароперегреватель.*

По отдельным стадиям технологического процесса всё теплоэнергетическое оборудование одноконтурной АЭС подразделяют на: реакторную, паротурбинную и конденсационную установки и конденсатно-питательный тракт. Взаимосвязь между этими элементами образует *тепловую схему станции.*

Рассмотрим упрощенную тепловую схему реакторной установки АЭС.



Реакторная установка-источник тепла, теплоноситель вода в реакторе нагревается и частично испаряется, образуя пароводяную смесь. В барабане сепараторе (БС) происходит разделение пароводяной смеси на воду и пар, пар направляется на турбину. Турбина состоит из одного цилиндра высокого давления (ЦВД) и четырех цилиндров низкого давления (ЦНД). В турбине происходит расширение пара и соответствующая работа.

Так как, пар поступает в турбину насыщенным то, расширяясь в турбине, он быстро увлажняется. Предельно допустимая влажность пара обычно не должна превышать 8-12% во избежание интенсивного эрозионного износа лопаточного аппарата каплями воды.

При достижении предельной влажности весь пар выводится из цилиндра высокого давления и пропускается через сепаратор - пароподогреватель (СПП), где он осушается и нагревается. Для подогрева основного пара до температуры насыщения используется пар первого обора турбины, для перегрева используется острый пар (смотри схему), дренаж греющего пара сливается в деаэратор, дренаж полученный после осушки пара - в ПНД.

После сепаратора - пароподогревателя пар поступает в цилиндр низкого давления. Здесь пар в процессе расширения снова увлажняется до предельно допустимой влажности и поступает в конденсатор (К). Стремление получить от каждого килограмма пара возможно большую работу и тем самым повысить КПД. заставляет поддерживать в конденсаторе возможно более глубокий вакуум. В связи с этим конденсатор и большая часть цилиндра низкого давления турбины находятся под разрежением. Тепло, передаваемое в конденсаторе охлаждающей воде, безвозвратно теряется. Величину потерь можно снизить путем уменьшения пропуска пара в конденсатор, что достигается направлением части пара в систему *регенеративных подогревателей* воды. Турбина имеет семь отборов пара, второй отбор используется для подогрева воды в деаэраторе, а отборы 3 - 7 используются для подогрева основного потока конденсата в, соответственно, ПНД-5, ПНД-1 (подогреватели низкого давления).

Так как цикл рабочего тела замкнут, то весь турбинный конденсат должен быть подан в барабан сепаратор. За счет работы насосов давление повышается от величины, характерной для конденсатора, до давления в барабане сепараторе, с учетом необходимости преодоления сопротивления тракта от конденсатора до барабана сепаратора. Этот тракт делят на две части.

Конденсатные насосы первой ступени (КН1) забирают конденсат из водяного объема конденсатора и прокачивают его через блочную очистную установку (БОУ), после чего, конденсатные насосы второй ступени (КН2) прокачивают основной конденсат через охладитель дренажа (ОД) и регенеративные подогреватели, называемые *подогревателями низкого давления,* до деаэратора (ДА) назначение которого в схеме будет объяснено позже. В деаэраторном баке, давление в котором выше атмосферного, создается определенный запас воды.

Питательным насосом (ПН), обеспечивающим последующее повышение давления вплоть до рабочего в барабане сепараторе, вода из деаэраторного бака подается в барабан сепаратор. Где происходит ее смешение с водой контура многократной принудительной циркуляции. Главными циркуляционными насосами (ГЦН), вода из барабана сепаратора подается в активную зону реактора, цикл замыкается.

Весь тракт от конденсатора до барабана сепаратора называют *конденсатно-питательным*, а его части до и после деаэратора - *конденсатным* и *питательным* трактами соответственно. В регенеративных подогревателях конденсат подогревается отборным паром турбин, конденсат которого возвращается в систему (в конденсатор).

Так как цилиндр низкого давления турбины работает в области вакуума, то трубопроводы отборного пара к ПНД, сами эти подогреватели по стороне греющего пара и линии конденсата греющего пара находятся под разрежением.

Из цилиндра высокого давления отбор пара производится также и для подогрева воды в сетевом подогревателе для отопления, вентиляции и горячего водоснабжения (на схеме это не показано).



Таким образом, по конденсатно-питательному тракту происходит увеличение давления и энтальпии рабочего тела. В реакторе установке энтальпия пара увеличивается при постоянном давлении до максимальной величины для данного цикла. Далее в паровой турбине энтальпия и давление пара непрерывно уменьшаются до давления в конденсаторе, где в связи с конденсацией пара при постоянном давлении энтальпия уменьшается до минимального значения для данного цикла, цикл замыкается.

В тепловой схеме барабан сепаратор изображался как одно устройство, на самом деле в установке РБМК-1000 используются четыре барабана сепаратора, которые представляют собой металлические цилиндры диаметром 2.6 м и длинной 31 м. Пароводяные коммуникации представляют собой сложную систему трубопроводов.