



Информационно-аналитический бюллетень
ПАО «Мосэнерго»

ЭНЕРГЕТИКА ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ



Выпуск № 4 / 2025

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ МУЛЬТИГЕНЕРАЦИИ

УДК 620.9:502/504
ББК 31+20.1
Э 40

Издание выходит с 2022 года

Главный редактор академик РАН **А.В. Клименко**

Э 40 **Энергетика, экология, энергосбережение** : бюллетень /
под редакцией академика РАН А.В. Клименко. — Москва :
ПАО «Мосэнерго», 2025. —

ISBN 978-5-383-01736-4

Вып. 4. Основы технологии мультигенерации / [В.С. Агабабов]. —
2025. — 36 с.

ISBN 978-5-383-01740-1

Раскрыто понятие мультигенерации и рассмотрены основы технологии ее использования. Приведены сведения из зарубежных и российских публикаций о результатах исследований эффективности и реализации мультигенерационных комплексов. Сформулированы требования к анализу основных положительных и отрицательных факторов, влияющих на решение вопросов внедрения технологии мультигенерации, а также методические основы определения эффективности указанной технологии. Приведены схемы комплексов мультигенерации для производства энергоносителей и иных необходимых потребителям продуктов, описан принцип действия этих схем. Уделено внимание взаимовостребованным установкам — направлению с взаимным использованием (для повышения эффективности генерации) вторичных энергетических ресурсов этих установок.

Источник фото на обложке: https://www.tergeh.ru/photos/projects/1056_bbPI2js2f4bDDwkBVRTI4iqH3UCbxGGy.jpg

**УДК 620.9:502/504
ББК 31+20.1**

ISBN 978-5-383-01740-1 (вып. 4)
ISBN 978-5-383-01736-4

© ПАО «Мосэнерго», 2025
© Агабабов В.С., 2025

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ МУЛЬТИГЕНЕРАЦИИ

СОДЕРЖАНИЕ

Введение. Что такое мультигенерация	3
1. Зарубежный и отечественный опыт построения систем мультигенерации	9
2. Оценка эффективности мультигенерации.....	15
3. Схемы мультигенерационных комплексов для производства энергоносителей и продуктов	19
Диоксид углерода	19
Сжатый воздух	21
Продукты разделения воздуха	21
Холод	24
Водород	27
4. Взаимовостребованные установки	31
Заключение	35
Список использованной литературы	36

ОБ АВТОРЕ



АГАБАБОВ
Владимир Сергеевич
Доктор технических наук, профессор.
Заслуженный ветеран труда «Мосэнерго»



<https://image.made-in-china.com/226f3j00TqaokLbtRpcG/Azbel-Cryogenic-Oxygen-Air-Separation-Unit-Oxygen-Gas-Plant-Liquid-Oxygen-Production-Line-for-Medical.webp>

Мультигенерация — совместное одновременное производство не менее двух энергоносителей и иных продуктов на объекте генерации с использованием различного рода установок, технологически связанных с основным оборудованием объекта

Введение. Что такое мультигенерация



Гарантированное обеспечение потребителей произведенными энергоносителями является основной задачей энергетического сектора страны. При этом повышение эффективности генерации энергии различных видов, снижение удельного потребления энергоносителей рассматриваются как обязательное условие дальнейшего развития энергетики, определенное в Энергетической стратегии России на период до 2050 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 12 апреля 2025 г. № 908-р.

Основой российской энергетики по-прежнему остается тепловая энергетика. В 2023 г. тепловые электрические станции (ТЭС) обеспечили выработку 65 % электроэнергии, планируется, что к 2050 г. эта доля составит не менее 60 %.

Существенную роль в повышении эффективности топливоиспользования играет оптимизация режимов работы действующего на сегодняшний день основного оборудования *объектов генерации*. При этом под объектами генерации понимаются как электростанции, производящие только электроэнергию (электростанции с турбинами конденсационного типа — КЭС), и котельные, производящие только теплоту, так и теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), совместно производящие электроэнергию и теплоту (технология когенерации).

Когенерация позволяет заметно повысить термодинамическую эффективность генерации как электроэнергии, так и теплоты. Однако постоянно обеспечивать оптимальные режимы работы оборудования ТЭЦ за счет технологии когенерации невозможно. Причиной необходимости работы основного оборудования ТЭЦ в не оптимальных режимах являются естественные сезонные и суточные различия потребления электроэнергии и теплоты. Так, например, потребление теплоты из систем централизованного теплоснабжения в летние месяцы года составляет в большинстве районов России 10—20 % от потребления в зимнее время. При этом, по данным ПАО «Мосэнерго», удельные расходы топлива на выработку электроэнергии при работе теплофикационных агрегатов в неотопительный период больше, чем в отопительный, на 40—50 %. Достаточно велика суточная неравномерность потребления электроэнергии. Дневные электрические нагрузки на некоторых объектах генерации превосходяточные более чем в два раза.

Известны различные способы обеспечения работы основного оборудования в режимах, близких к оптимальным. Так, при длительной работе с пониженной нагрузкой объектов генерации в летнее время часть энергоблоков может быть отключена, однако при краткосрочных уменьшениях востребованной электрической мощности реализация такого способа затруднительна и малоэффективна. Длительное же снижение востребованной тепловой нагрузки на ТЭЦ в летний период заставляет эксплуатировать энергоблоки с теплофикационными турбоагрегатами с пониженным отпуском потребителю теплоты и даже в конденсационном режиме,

Введение. Что такое мультигенерация

что, как отмечалось, приводит к существенному увеличению удельных расходов топлива на выработку электроэнергии по сравнению с удельными расходами при работе оборудования в оптимальном расчетном режиме. Теоретически возможно для обеспечения работы основного оборудования с постоянной нагрузкой в оптимальном режиме аккумулировать часть невостребованной электрической энергии и теплоты, однако такие технологии достаточно сложны и пока не нашли широкого применения [1].

Один из возможных способов обеспечения работы основного оборудования объектов генерации в близких к оптимальным режимам в периоды провалов электрической и тепловой нагрузок — организация на тепловых электростанциях комплексов для производства энергоносителей и иных продуктов, необходимых потребителям для обеспечения технологических процессов на промышленных предприятиях (в том числе и на самом объекте генерации) и использования в социальной сфере. Такими произведенными энергоносителями могут быть, например, холод, сжатый воздух, водород и другие, а полезными продуктами — продукты разделения воздуха (кислород, азот, аргон, неон, криpton, ксенон), химические удобрения, оросительная вода, при производстве которых используются электроэнергия либо теплота.

Таким образом, на электростанциях для повышения эффективности использования первичных энергоносителей применяется технология, позволяющая совместно производить не только электроэнергию и теплоту, но и различного рода энергоносители и иные продукты для промышленных и других предприятий. Такая технология получила название *мультигенерация*.

В более общем виде понятие мультигенерации может быть определено как совместное одновременное производство не менее двух энергоносителей и иных продуктов на объекте генерации с использованием различного рода установок, технологически связанных с основным оборудованием объекта.

Выбор дополнительно производимых энергоносителей и иных продуктов должен определяться характерными режимами работы объекта генерации (электростанции или котельной) и воз-

можностями их реализации. При этом некоторые из производимых продуктов могут быть предназначены не только для сторонних предприятий, но также и для самого объекта.

Несомненно, выбор производимых продуктов подразумевает установку необходимого оборудования. Это может быть предусмотрено изначально при строительстве энергетического объекта. Например, в проект сооружения паротурбинной ТЭЦ сразу закладывается возможность использования теплофикационной турбины, обеспечивающей получение электроэнергии и теплоты. В соответствии с приведенным выше определением, когенерация — простейший пример мультигенерации. Возможен и другой случай, когда решение о расширении числа производимых продуктов принимается применительно к уже существующему энергообъекту. Тогда требуется поставка дополнительного оборудования, которое размещается непосредственно на энергообъекте и технологически связано с его основным оборудованием. Так, если стоит задача получения на ТЭЦ холода, то можно установить абсорбционную холодильную машину,рабатывающую холод за счет потребления произведенной теплоты и незначительного количества электрической энергии. Таким образом, имеем тригенерационную установку, обеспечивающую одновременное совместное производство электроэнергии, теплоты и холода.

На рис. 1 схематически показаны потоки энергоносителей и получаемые продукты на ТЭС по мере увеличения их числа.

В простейшем случае (рис. 1, а) энергия топлива преобразуется только в электроэнергию. При этом в окружающую среду выбрасываются продукты сгорания топлива, сточные воды. Те же выбросы сопровождают совместное производство электроэнергии и теплоты (когенерация) (рис. 1, б). Когда на ТЭС одновременно вырабатываются электричество, теплота и холод (рис. 1, в), то имеем случай тригенерации. Наконец, в наиболее общем варианте (рис. 1, г) реализуется технология мультигенерации (используется также термин полигенерация): помимо поставки различных видов энергии в таком комплексе организовано производство различных полезных продуктов (энергоносители, технические газы, химические удобрения и пр.). При этом разнообразие быть

не только на выходе из комплекса (произведенная продукция), но и на входе в него могут использоваться различные источники энергии (не только органическое топливо, но и биомасса, солнечная и ветровая энергия).

Еще раз вернемся к приведенному выше определению мультигенерации. Это определение предполагает одновременное производство именно на объекте генерации не менее двух энергоносителей либо иных полезных продуктов. Для этого на электростанции может устанавливаться дополнительное оборудование для производства различных энергоносителей либо иных полезных продуктов (холод, водород, кислород и т.д.), а его работа обеспечивается за счет использования электроэнергии и теплоты, генерируемых ТЭЦ. Производство энергоносителей и продуктов локализовано в одном комплексе. Если произведенные электроэнергия и теплота используются за его пределами, то такой случай не укладывается в определение и не может рассматриваться как мультигенерация. Именно такой случай стал предметом анализа в статье [2]. Автор статьи рассмотрел различные возможности использования производимых на ТЭЦ энергоносителей для повышения эффективности генерации электроэнергии и теплоты в режимах, когда внешние факторы не позволяют их использовать полностью, для обеспечения работы некоторых направлений городского хозяйства. Такой подход в [2] был назван *n*-генерация. Автором были предложены достаточно интересные и, несомненно, полезные технические решения, например такие, как зарядка электромобилей, утилизация снега, регенерация противогололедных реагентов, переработка сточных вод, подготовка технической и питьевой воды, утилизация мусора, очистка воздуха городских магистралей и некоторые другие. В статье рассмотрены также вопросы применения централизованных и децентрализованных вариантов электро- и теплоснабжения. Тем не менее предложенная *n*-генерация не может быть отнесена к направлению, имеющему название мультигенерация.

Основным отличием *n*-технологии от технологии мультигенерации являются пути их реализации и возникающие при этом имущественные отношения. Если при мультигенерации потребителю передаются уже готовые к применению различные продукты (холод, кислород, водород

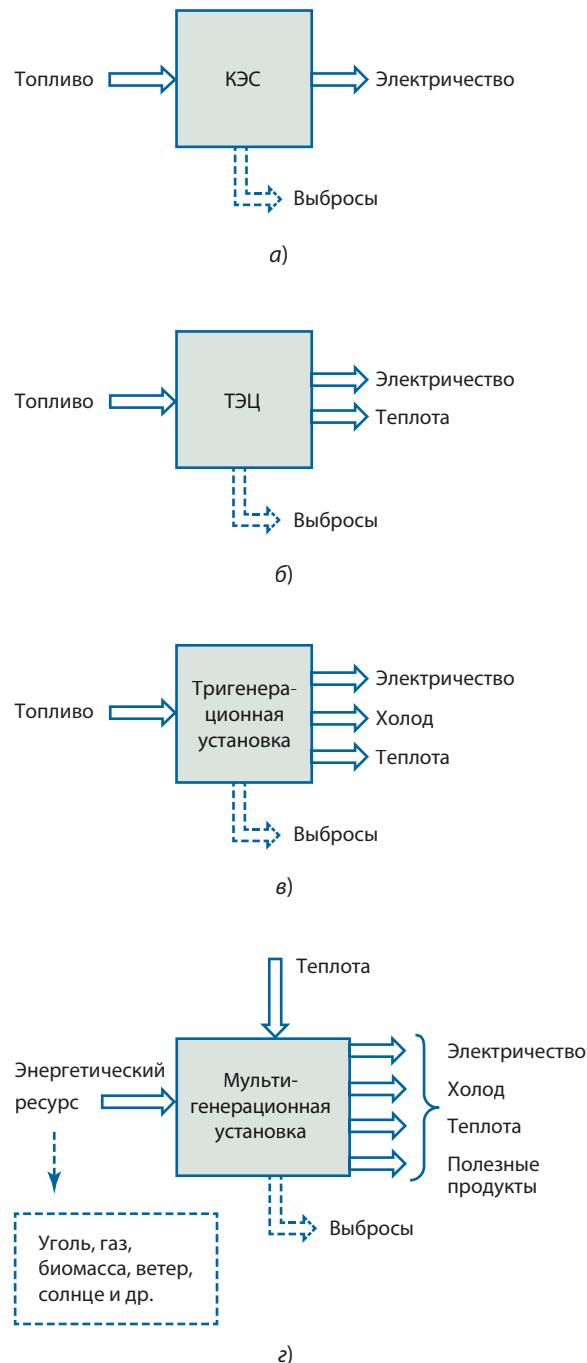


Рис. 1.
Производство энергоносителей и иных продуктов с помощью различных генерирующих систем:
а — электрогенерация; *б* — когенерация; *в* — тригенерация; *г* — мультигенерация

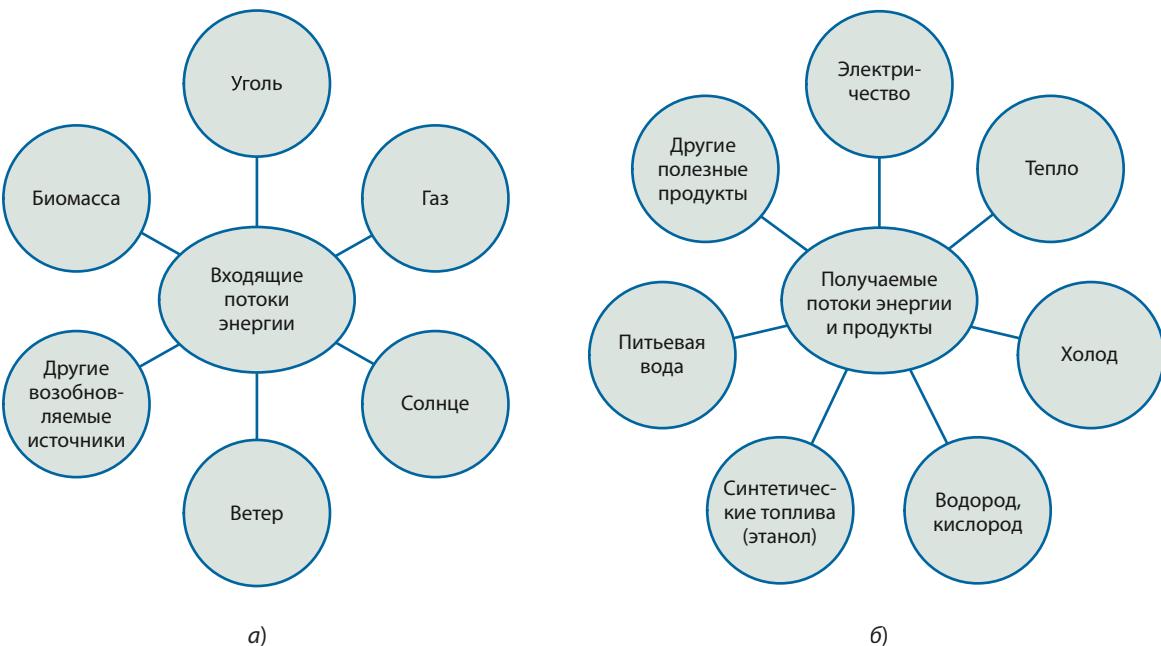


Рис. 2.
Набор входящих и выходящих потоков в мультигенерационном комплексе:
а — входящие потоки; б — выходящие потоки

и т.д.), произведенные на оборудовании, установленном на объекте генерации, то при n -генерации потребитель получает произведенные на ТЭЦ излишки электроэнергии и теплоты, которые использует для энергоснабжения установленного у себя оборудования, и он сам генерирует необходимые по технологии продукты.

Далее изложение будет ограничено рассмотрением вопросов использования технологии мультигенерации применительно к ТЭЦ. Однако сама концепция одновременного производства нескольких видов энергии, энергоносителей, полезных продуктов является универсальной. Она применима, в частности, к атомным и гидроэлектрическим станциям, а также к возобновляемым источникам энергии. Набор входящих и выходящих потоков в мультигенерационном

комплексе исключительно разнообразен (рис. 2), предложены и обсуждаются десятки возможных вариантов.

Отметим, что примером мультигенерации служат вызывающие в настоящее время повышенный интерес энергетические установки, использующие технологии кислородного сжигания топлива [3]. Они рассматриваются как одно из перспективных направлений построения экологически чистой энергетики и существенного снижения негативного воздействия тепловой генерации на климат планеты. Предлагаемые схемы этих установок позволяют сразу же отнести их к классу мультигенерационных, поскольку они предполагают производство электроэнергии, теплоты, холода, диоксида углерода и продуктов разделения воздуха.





https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/31/Schornstein%2C_Heizkraftwerk_Nord%2C_Chemnitz.jpg

Проблемы мультигенерации находятся
в центре внимания ученых и специалистов

1

Зарубежный и отечественный опыт построения систем мультигенерации



Проблемы мультигенерации находятся постоянно в центре внимания ученых и специалистов. За последние 25 лет по этой тематике опубликовано более тысячи работ.

Анализ заключений и выводов авторов этих работ позволяет сделать некоторые обобщения.

1. Авторы практически всех публикаций рассматривают развитие совместного производства энергоносителей (систем мультигенерации) как перспективное направление развития систем энергоснабжения, позволяющее уменьшить потребление первичных энергоносителей, а также, как следствие, выбросы CO_2 в атмосферу на используемое топливо электростанциях.

2. Явно прослеживается тенденция развития совместной генерации энергоносителей: от двух- и трехкомпонентной технологии к мультигенерации. При этом в качестве произведенных энергоносителей рассматриваются как традиционные электроэнергия, теплота и холод различных параметров, так и водород, продукты разделения воздуха и т.п., а также и другие продукты, например метanol и иные химические вещества, обладающие рыночным потенциалом.

3. Предлагается в дальнейших исследованиях расширить состав первичных энергоносителей, которые могут быть использованы в мультигенерирующих системах, включая существующие виды используемого топлива и возобновляемые источники энергии, а также рассмотреть различные сочетания и тех, и других (рис. 2).

4. При оценке эффективности систем применялось несколько термодинамических критериев (табл. 1). Нетрудно видеть, что различие между критериями, определяемыми на основе характеристик теплового баланса (критерии 1—4 в табл. 1), весьма условно. Они взаимосвязаны, и вряд ли можно отдать предпочтение какому-либо из них. Наряду с ними используется и такой критерий, как количество выбросов CO_2 в атмосферу. Разумеется, этот критерий не может рассматриваться как вполне самостоятельный, поскольку он однозначно связан с экономией используемого используемого органического топлива. Его появление в числе критериев, на наш взгляд, обусловлено тем исключительно внимательным отношением, которое проявляет западная общественность к проблеме глобального потепления.

1. Зарубежный и отечественный опыт построения систем мультигенерации

Таблица 1

Термодинамические критерии оценки эффективности мультигенерационных систем

Критерий	Определение	Обозначение, примечание
1. Абсолютная экономия первичной энергии, $\Delta Q_{\text{абс}}$	$\Delta Q_{\text{абс}} = \sum_{i=1}^n Q_i - Q_{\text{совм}}$	Q_i — расход энергии при раздельном производстве i -го энергоносителя (продукта); $Q_{\text{совм}}$ — расход энергии при совместном производстве тех же энергоносителей и полезных продуктов
2. Относительная экономия первичной энергии, $\Delta q_{\text{отн}}$	$\Delta q_{\text{отн}} = \frac{\Delta Q_{\text{абс}}}{\sum_{i=1}^n Q_i}$	
3. Относительный критерий экономии топлива, ϑ	$\vartheta = \frac{\Delta Q_{\text{абс}}}{\sum_{i=1}^n Q_i}$	
4. Коэффициент использования теплоты топлива, КИТТ	$\text{КИТТ} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{Q_{\text{топл}}}$	N_i — энергия i -го произведенного энергоносителя; $Q_{\text{топл}}$ — энергия первичного топлива
5. Экологический критерий (относительное уменьшение выбросов CO ₂)	$\Delta M_{\text{CO}_2} = \frac{M_{\text{разд}} - M_{\text{совм}}}{M_{\text{разд}}}$	M — выбросы при раздельном (разд) и совместном (совм) производстве энергоносителей
6. Эксергетический коэффициент энергосбережения, η_e	$\eta_e = \frac{E_{\text{разд}} - E_{\text{совм}}}{E_{\text{разд}}}$	E — эксергия при раздельном (разд) и совместном (совм) производстве энергоносителей

Удивительно, но в анализируемых работах довольно редко используется эксергетический метод (критерий 6), хотя показания к его использованию очевидны: произведенные энергоносители могут заметно отличаться по своей энергетической ценности. Скорее всего, это происходит из-за простоты использования понятия энергии, которая в конечном итоге, в отличие от эксергии, является «платной». Поэтому энергетические показатели по-прежнему широко применяются.

5. Наряду с термодинамическими используются и экономические показатели, а также социально-экономические показатели. При этом в различных публикациях эти показатели рассматриваются как для объектов генерации, так и для потребителей.

Отмечается, что экономическая оценка может относиться к операционным аспектам (например, для разработки оптимальных операционных стратегий для каждого продукта совмещенной генерации на основе соответствующих цен на энергоносители) или к аспектам планирова-

ния (например, для определения лучших технологий, размеров и топологий системы в целях минимизации общей стоимости или максимизации прибыли). Соответствующие индикаторы (критерии) необходимы для количественного определения эффективности различных операционных стратегий в разных условиях (с учетом определенной энергетической системы) или для определения наилучшего решения и ранжирования различных альтернатив на стадии проектирования. Тогда критерии оценки могут иметь детерминированный характер (когда предполагается, что соответствующие переменные известны с уверенностью или когда приведены средние значения из данного распределения) или вероятностный характер (когда дается хотя бы одна из переменных через стохастическую модель, которая может быть, например, основана на непрерывной или дискретной функции распределения вероятностей, а затем соответствующие результаты также могут быть даны с вероятностным описанием, из которых могут быть извлечены синтетические метрики, такие как средние значения).

Таблица 2

Потребности в произведенных энергоносителях и иных продуктах для промышленных и социальных объектов

Энергоноситель	Вид промышленности, объекты использования
Холод	Здания и сооружения, медицина, металлургия, строительство, пищевая промышленность
Кислород	Нефтегазовая, химическая и пищевая промышленность, металлургия, энергетика, машиностроение, медицина, сельское хозяйство
Азот	Химическая и нефтяная промышленность, металлургия, производство электрооборудования, электронного и оптического оборудования
Аргон	Машиностроение, строительство, электроника и приборостроение, металлургия
Водород	Нефтяная, химическая и пищевая промышленность, энергетика, бытовые цели, сельское хозяйство, военная и авиационная промышленность, топливное хозяйство, транспорт
Сжиженный природный газ	Транспорт, энергоснабжение и нефтехимическая промышленность, обработка вторичного сырья, производство и распределение электроэнергии, газа и воды, добыча полезных ископаемых
Сжатый воздух	Металлургия, пищевая, химическая и нефтедобывающая промышленность, машиностроение, угольная и горная промышленность, энергетика, строительство и деревообрабатывающая промышленность, малое пневматическое оборудование, транспортирующие пневматические установки, транспорт и связь

6. В области мультигенерации сложилась парадоксальная ситуация. С одной стороны, практически единодушно признается, что объединение в одном комплексе производств различных видов энергии и полезных продуктов несет несомненное преимущество с точки зрения наиболее полного использования располагаемого энергетического потенциала. С другой стороны, примеров целенаправленной практической реализации этой идеи очень немного. Одним из них являются системы централизованного хладоснабжения, которые получили определенное распространение в странах Западной Европы и США. Так, например, холодильная мощность установок централизованного хладоснабжения, существовавших в Германии в конце 2005 года, составляла 700 МВт. При этом в год централизованно производилось около 600 ГВт·ч холода. В частности, подобная установка централизованного теплохладоснабжения работает в Германии в г. Кемниц (Chemnitz). Потребителями холода являются магазины, офисные здания, оперный театр, технический университет. Общая установленная мощность оборудования потребителей составляет около 15 МВт.

Говоря об особенностях эксплуатации объектов энергетики в условиях России, необходимо отметить, что на сегодняшний день технология мультигенерации, при которой помимо электроэнергии и теплоты на объекте генерации производится еще и какой-либо другой энергоноситель либо продукт, в «большой» энергетике практического применения не нашла. Однако результаты уже проведенных исследований показывают, что преимущества, которые дает организация работы объектов «большой» энергетики в режиме мультигенерации, могут быть достаточно весомы (например, [3—8]).

Анализ литературы и изучение различных промышленных технологий позволяют определить основные энергоносители и иные продукты, которые могут быть использованы различными потребителями помимо электроэнергии и теплоты. Эти данные приведены в табл. 2.

Приведенные в табл. 2 сведения свидетельствуют о широких возможностях реализации произведенных энергоносителей и на

1. Зарубежный и отечественный опыт построения систем мультигенерации

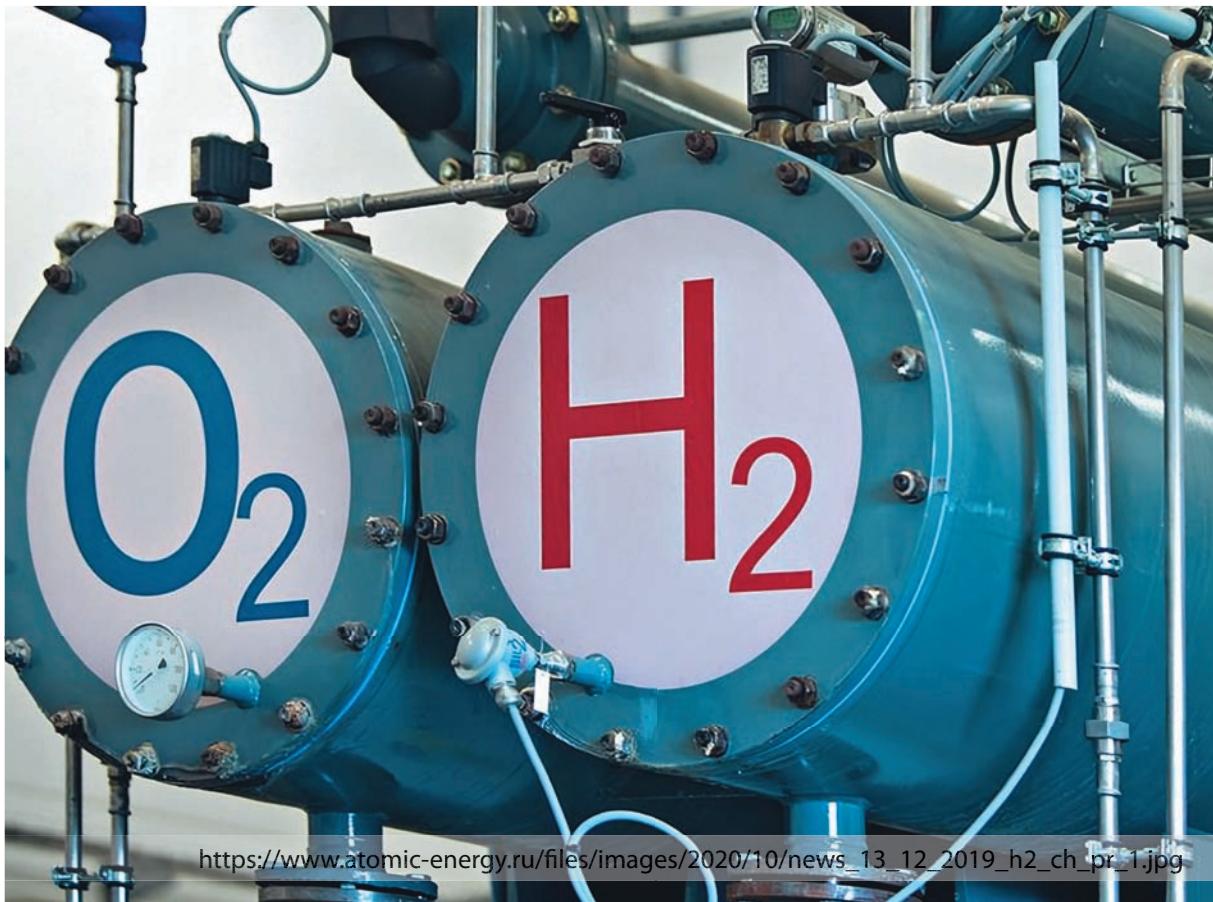
промышленных предприятиях, и на объектах социальной сферы.

Особо следует выделить потребности в произведенных энергоносителях объектов энергетики. Так, для нужд ТЭС используются различные произведенные энергоносители:

- 1) *водород* — на турбоустановках с водородным охлаждением генератора;
- 2) *кислород* — при ремонтах и монтаже оборудования: для резки металла и труб, для сварки и термообработки труб малого диаметра, для подогрева металла и труб при производстве подгоночных работ и для других нужд;
- 3) *горючие газы* — для газовой резки и производства сварочных работ при ремонте и монтаже

оборудования на тепловых электростанциях. Особо большое распространение получили ацетилен, пропан-бутан, природный газ;

- 4) *сжатый воздух* — для различных операций, например для опрессовки газопроводов и трубопроводов; при эксплуатации приводов пневматического инструмента; в воздушных выключателях и приводах других коммутационных аппаратов;
- 5) *холод* — для кондиционирования помещений, для создания и автоматического поддержания (регулирования) в закрытых помещениях всех или отдельных параметров температуры на определенном уровне в целях обеспечения оптимальных климатических условий, наиболее благоприятных для самочувствия людей и ведения технологического процесса.





<https://www.infrost.ru/upload/medialibrary/845/4x1tf3zvqiy42x415e027yumbbb1guuf.jpg>



http://geliymash.ru/wp-content/uploads/2019/07/img_9300.jpg

Преимущества при использовании технологии мультигенерации получают как сами объекты генерации, так и потребители

2 Оценка эффективности мультигенерации



Несомненно, что использование технологии мультигенерации требует решения многих вопросов. К ним относятся вопросы, связанные с созданием и функционированием объектов, которые будут работать в режиме мультигенерации: с приобретением и внедрением дополнительного оборудования; с организацией его работы в переменных, напрямую зависящих от условий работы основного оборудования режимах; с созданием систем транспортировки и аккумулирования произведенных энергоносителей и иных продуктов и некоторые другие. Однако проведенные в различных странах исследования [4—6] показали значительные энергетические и экономические преимущества, которые может дать и дает применение технологии мультигенерации на объектах энергетики.

Преимущества при использовании технологии мультигенерации получают как сами объекты генерации, так и потребители: и у тех, и у других улучшаются финансово-экономические показатели. Для объектов генерации повышение эффективности будет определяться как ростом тепловой экономичности работы основного оборудования и связанным с этим снижением расходов на топливо, так и возможностью продажи дополнительно произведенных энергоносителей. Преимущества потребителей при этом возможны в тех случаях, если снизится стоимость энергоносителей, произведенных по технологии мультигенерации.

Преимущества, получаемые объектами генерации:

- увеличивается тепловая экономичность работы объекта генерации за счет повышения эффективности использования основного оборудования вследствие обеспечения его работы в периоды провалов электрической и в особенности тепловой нагрузки в оптимальных, определяемых конструктивными особенностями оборудования режимах, что приводит к уменьшению удельных расходов топлива на выработку электроэнергии и теплоты и обеспечивает снижение общих расходов топлива на производство электроэнергии (на КЭС) либо электроэнергии и теплоты (на ТЭЦ);
- объект генерации продает централизованно излишки произведенных энергоносителей, имея дополнительную выручку от продажи произведенной продукции;
- если дополнительно произведенные энергоносители необходимы и самому объекту генерации, отпадает необходимость их покупки на стороне.

Преимущества, получаемые потребителями:

- потребители закупают меньше электроэнергии и теплоты, оплачивая при этом централизованную поставку необходимых произведенных энергоносителей, что при разумном подходе должно привести к снижению общих затрат на энергоносители;

2. Оценка эффективности мультигенерации

- отказ от собственного производства необходимых для организации технологических процессов энергоносителей и иных продуктов упрощает организацию работы предприятия и повышает надежность выпуска продукции.

Важно также то, что снижение расхода первичного энергоносителя (топлива) способствует решению общегосударственной задачи сохранения природных ресурсов страны и улучшения экологической обстановки.

Наряду с преимуществами технологии мультигенерации необходимо учесть возникающие при ее реализации определенные сложности. К ним относятся:

на объекте генерации:

- капитальные вложения во вновь устанавливаемое на объекте генерации оборудование;
- организация эксплуатации нового оборудования;
- транспортировка произведенных энергоносителей и иных продуктов потребителям;
- возможное аккумулирование произведенных энергоносителей и иных продуктов.

у потребителей:

- изменение системы потребления произведенных энергоносителей и иных продуктов;
- возможное аккумулирование некоторых из централизованно полученных произведенных энергоносителей и иных продуктов.

При оценке потенциальных возможностей генерации производимых энергоносителей и иных полезных продуктов необходимо проведение анализа состава, состояния и режимов работы основного оборудования объекта генерации, для чего следует:

- построить и проанализировать характерные графики отпускаемых потребителям электрической и тепловой мощностей (суточные, сезонные, годовые);
- построить и проанализировать годовые графики средних за месяц удельных расходов топлива на выработку электроэнергии и теплоты;

- построить и проанализировать характерные для разных сезонов суточные графики средних за час удельных расходов топлива на выработку электроэнергии и теплоты;
- определиться с имеющимися видами топлива и их лимитами в периоды работы объектов генерации со сниженными электрической и тепловой нагрузками;
- определить возможные для использования при генерации энергоносителей и иных полезных продуктов избытки электрической и тепловой мощностей (суточные, сезонные, годовые).

Термодинамическая эффективность для отдельно взятого объекта генерации при внедрении технологии мультигенерации определяется изменением удельных расходов топлива на выработку электроэнергии ($\Delta b_{\text{т}N}$) и теплоты ($\Delta b_{\text{т}Q}$) по сравнению с теми же показателями при работе до внедрения этой технологии. При этом следует сравнивать удельные расходы топлива при исходных режимах работы с пониженными электрическими ($b_{\text{исх}N}$) и тепловыми ($b_{\text{исх}Q}$) нагрузками и при номинальных параметрах работы этих показателей ($b_{\text{ном}N}$) и ($b_{\text{ном}Q}$):

$$\Delta b_{\text{т}N} = b_{\text{исх}N} - b_{\text{ном}N}, \quad (1)$$

$$\Delta b_{\text{т}Q} = b_{\text{исх}Q} - b_{\text{ном}Q}. \quad (2)$$

В качестве периода времени следует рассматривать календарный месяц. Годовое снижение расхода топлива на выработку электрической энергии и теплоты $\Delta B_{\text{год}}$ определяется выражением

$$\Delta B_{\text{год}} = \sum_{\tau=1}^{12} \Delta B_{\tau}, \quad (3)$$

где ΔB_{τ} — снижение расхода топлива на выработку электрической энергии и теплоты в каждом месяце года.

Таким образом, для определения годового снижения расхода топлива на выработку электрической энергии и тепла на объекте генерации после внедрения технологии мультигенерации необходима следующая исходная для расчетов информация:

- среднемесячные в течение календарного года электрическая $N_{\text{э,ср}}$ и тепловая $Q_{\text{т,ср}}$ мощности объекта генерации;

- среднемесячные в течение календарного года удельные расходы топлива на выработку электроэнергии ($b_{исх\ N}$) и теплоты ($b_{исх\ Q}$);
- удельные расходы топлива на выработку электроэнергии ($b_{ном\ N}$) и теплоты ($b_{ном\ Q}$) при работе в номинальных режимах.

Экономическая эффективность технологии мультигенерации для отдельно взятого объекта генерации определяется в соответствии с акту-

альной методикой, применяемой для определения эффективности.

При анализе возможности и целесообразности использования технологии мультигенерации на каждом из энергетических объектов необходимо построение и анализ схем предполагаемого объекта. При этом на предпроектной стадии достаточно построение и анализ работы структурных и технологических схем.



https://iec-energy.ru/upload/resize_cache/sprint.editor/b63/1920_1080_1/uikqx51qsur3ax2svrb3wxk59chp6060.jpeg



<https://akvilon-holod.ru/holodilnye-ustanovki/avtomatizaciya-holodilnyh-ustanovok/avtomatizatiy-holodilnih-ustanovok13.jpg>

Внедрение технологии мультигенерации
на объектах энергетики в каждом
конкретном случае требует проведения
глубоких исследований

3 Схемы мультигенерационных комплексов для производства энергоносителей и продуктов



В рамках настоящей статьи невозможно описать все существующие схемы производства различных энергоносителей и иных полезных продуктов. По этой причине было принято решение остановиться на нескольких схемах, наиболее интересных для условий работы электростанций ПАО «Мосэнерго».

При этом в качестве исходных принятые традиционные схемы ТЭЦ, изначально работающих в различных режимах когенерации. Рассмотрены схемы производства диоксида углерода, сжатого воздуха, продуктов разделения воздуха, водорода, холода. Способы и схемы получения сжиженного природного газа приведены в [9].

При разработке схем были использованы материалы, изложенные ранее в некоторых публикациях, например в [3—8, 10].

Диоксид углерода

На рис. 3 представлена структурная схема производства диоксида углерода (CO_2) в различных фазовых состояниях (газообразное, жидкое, твердое) на объекте генерации с паротурбинной установкой теплофикационного типа с использованием отходящих дымовых газов.

В этом случае основными составными элементами объекта генерации являются котельная установка 3, паротурбинная установка теплофикационного типа 4, абсорбер 18, десорбер 21, холодильник газа 25, блок сжижения газообразного CO_2 31, блок производства сухого льда (твердого CO_2) 34.

Принцип функционирования установки, структурная схема которой приведена на рис. 3, заключается в следующем.

В котельную установку 3 по линиям 1 и 2 подается топливо и воздух соответственно. Пар из котельной установки 3 поступает в паровую турбину 4, где далее используется для генерации электроэнергии в генераторе 5 и теплофикации потребителя посредством теплофикационной установки 10. Дымовые газы из котельной установки 3 по линии 15 подаются на дальнейшее производство CO_2 . В первую очередь дымовые газы проходят блок охлаждения и промывки от примесей 16,

3. Схемы мультигенерационных комплексов для производства энергоносителей и продуктов

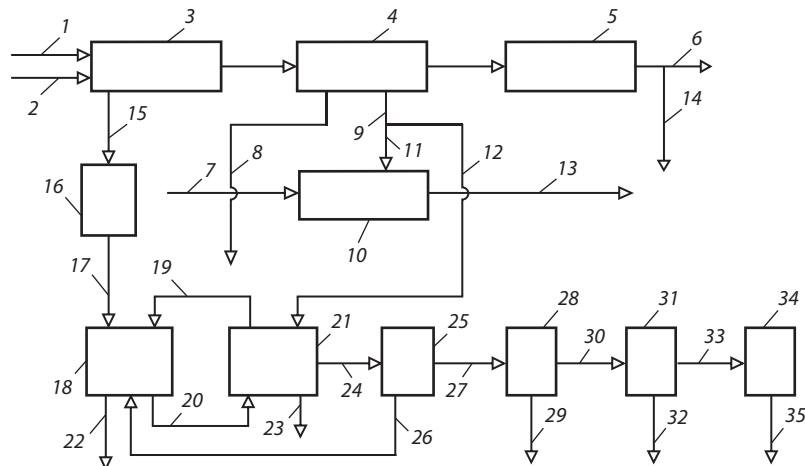


Рис. 3.

Структурная схема производства газообразного, жидкого, твердого диоксида углерода:

1 — топливо; 2 — воздух; 3 — котельная установка; 4 — паротурбинная установка; 5 — электрогенератор; 6 — электроэнергия потребителю; 7 — обратная сетевая вода; 8 — пар промышленного отбора на установки генерации производимых энергоносителей; 9 — пар теплофикационных отборов; 10 — теплофикационная установка; 11, 12 — пар теплофикационных отборов соответственно на теплофикационную установку и десорбер диоксида углерода; 13 — прямая сетевая вода; 14 — электроэнергия на установки генерации производимых энергоносителей; 15 — дымовые газы; 16 — блок охлаждения и промывки дымовых газов от примесей; 17 — очищенный и охлажденный поток дымовых газов; 18 — абсорбер CO₂; 19 — истощенный раствор абсорбента; 20 — насыщенный CO₂ раствор абсорбента; 21 — десорбер; 22 — оставшиеся не поглощенными элементы (азот, диоксид азота); 23 — конденсат греющего пара из десорбера; 24 — парогазовая смесь CO₂, воды и абсорбента; 25 — холодильник газа; 26 — конденсат раствора абсорбента; 27 — влажный CO₂; 28 — блок очистки газообразного CO₂; 29, 30 — газообразный CO₂ соответственно потребителю и на технологию сжижения; 31 — блок сжижения газообразного CO₂; 32, 33 — жидкий CO₂ потребителю и для получения сухого льда; 34 — блок производства сухого льда (твердого CO₂); 35 — сухой лед потребителю

содержащий многоступенчатую скрубберную систему. Очищенные и охлажденные дымовые газы по линии 17 подаются в абсорбер 18, где происходит абсорбция CO₂ из дымовых газов раствором абсорбента, который подается в абсорбер по линии 19. Оставшиеся не поглощенным азот и диоксид азота удаляются в атмосферу по линии 22, а насыщенный диоксидом углерода раствор абсорбента по линии 20 подается в десорбер 21, где из раствора абсорбента происходит десорбция CO₂ путем нагрева и кипячения с помощью водяного пара, поступающего по линии теплофикационного отбора 12 из паровой турбины 4. Конденсат греющего пара отводится из десорбера 21 по линии 23. Парогазовая смесь CO₂, H₂O и абсорбента по линии 24 подается в хо-

лодильник газа 25, в качестве которого применяют кожухотрубчатые и элементные аппараты. В результате охлаждения парогазовой смеси образуется конденсат вторичных водяных паров, насыщенный газообразным CO₂ и содержащий абсорбент. Для восстановления первоначальной концентрации и количества раствора конденсат по линии 26 возвращается в абсорбер 18. После охлаждения влажный CO₂ по линии 27 направляется на очистку и сжатие в компрессоре в блок очистки 28, где газ промывается в промывных колоннах раствором марганцовокислого калия (KMnO₄) и водой. Подготовленный газообразный CO₂ направляется потребителю по линии 29. По линии 30 газообразный CO₂ отводится в блок сжижения 31, где сжимается до давления кон-

денсации при отводе теплоты в окружающую среду. Электроэнергия для привода компрессора подается в блок сжижения 31 по линии 14. Жидкий CO₂ по линии 32 направляется потребителю в виде транспортных емкостей (баллонов, изотермических цистерн). По линии 33 жидкий CO₂ подается в блок получения сухого льда (твердого CO₂) 34 путем ступенчатого дросселирования с дальнейшим уплотнением получающейся при этом снегообразной массы. По линии 35 готовый сухой лед направляется потребителю. В тех случаях, когда на объекте генерации применяются паротурбинные установки с турбинами типа ПТ, пар производственных отборов (линия 8) может использоваться и для генерации других производимых энергоносителей.

В представленной выше структурной схеме производства диоксида углерода рассматривается получение всех видов CO₂ (газообразного, жидкого, твердого). Однако не всегда требуется объединять производство всех видов товарного CO₂ на одной установке. Поэтому возможны разные комплектации схемы для производства: как только одного вида CO₂, так и нескольких видов.

Сжатый воздух

Система производства сжатого воздуха включает в себя компрессорные и воздуходувные станции, трубопроводный и баллонный транспорт для подачи сжатого воздуха потребителям. Компрессорные станции включают в свой состав: компрессоры, приводные двигатели, устройства для забора воздуха, очистки его от пыли, теплообменники охлаждения и другое вспомогательное оборудование. На компрессорной станции могут размещаться поршневые, осевые и иного вида компрессоры с электрическим и паровым приводом. Установки производства сжатого воздуха с поршневым и осевым компрессорами с электрическим и паровым приводами достаточно широко распространены в энергетике. В этой связи в статье приводится лишь схема производства сжатого воздуха с применением пара промышленных отборов ТЭЦ.

Схема установки производства сжатого воздуха с помощью пара промышленных отборов ТЭЦ приведена на рис. 4. В установке применены осевые компрессоры.

Основными элементами объекта генерации ТЭЦ являются котельные установки 3, паротурбинные установки 4 с промышленным и отопительными отборами и электрогенераторы 5. Основными элементами схемы установки производства сжатого воздуха являются воздухозаборное устройство и фильтры очистки воздуха от пыли 15, приводная турбина компрессора 16 и двухступенчатый компрессор с промежуточным холодильником (18—20). Принцип функционирования установки заключается в следующем.

Топливо на котельные установки подается по линии 1, воздух — по линии 2. Теплота, получаемая в котельных установках 3, передается паротурбинным установкам 4. Электрическая энергия от генераторов 5 подается потребителю по линии 6. Пар промышленных отборов подается на приводную турбину 16 компрессора по линии 8 и отводится из приводной турбины 16 по линии 17. Воздух поступает в воздухозаборное устройство 15 на фильтры очистки от пыли. Затем воздух попадает в первую ступень 18 осевого компрессора. В промежуточном холодильнике 19 происходит охлаждение воздуха для повышения его плотности и эффективности работы компрессора. Далее воздух сжимается во второй ступени компрессора 20, охлаждается в концевом холодильнике 21, проходит очистку во влаго- и маслоотделителе 22, поступает в ресивер 23 и по линиям 24 направляется потребителю.

Продукты разделения воздуха

Для обеспечения работы установок для производства продуктов разделения воздуха во всех технологических схемах в качестве первичного энергоносителя требуется электроэнергия: при криогенном способе — для сжатия и глубокого охлаждения воздуха, при мембранным и адсорбционном способах — для сжатия.

Схема установки для производства продуктов разделения воздуха криогенным способом на ТЭЦ показана на рис. 5.

Основными элементами объекта генерации ТЭЦ являются котельные установки 3, паротурбинные установки 4 с промышленным и отопительными отборами и электрогенераторы 5. Основными элементами схемы установки производства продуктов разделения воздуха являются

3. Схемы мультигенерационных комплексов для производства энергоносителей и продуктов

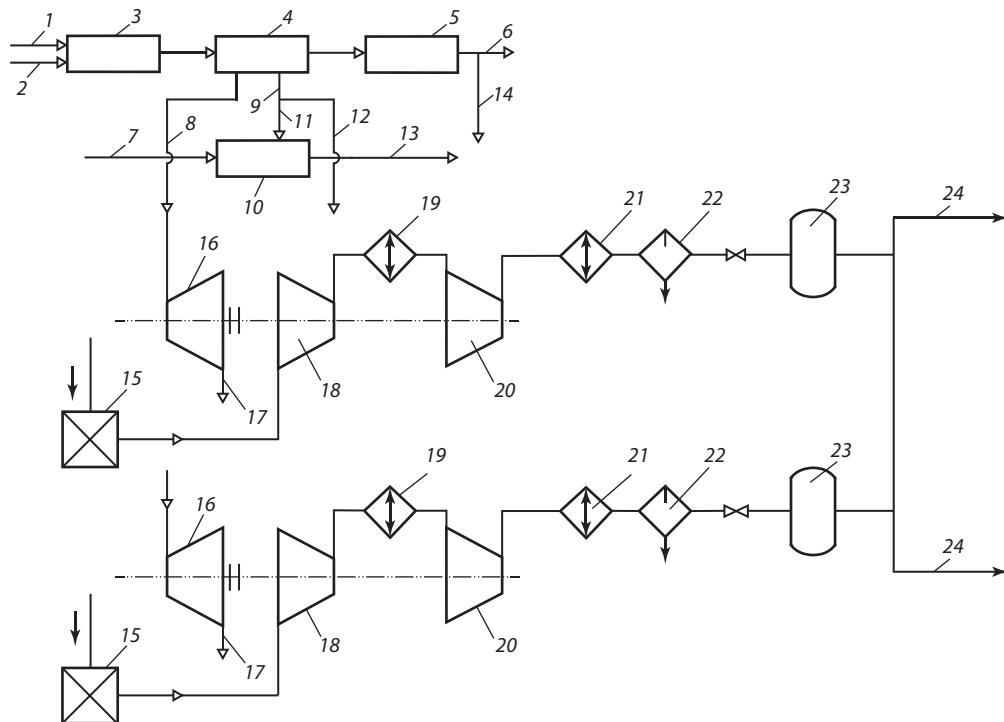


Рис. 4.

Схема производства сжатого воздуха на компрессорной станции с применением пара промышленных отборов ТЭЦ с осевыми компрессорами с паротурбинным приводом:

1 — топливо; 2 — воздух; 3 — котельные установки; 4 — паротурбинные установки; 5 — электрогенераторы; 6 — электроэнергия внешнему потребителю; 7 — обратная сетевая вода; 8 — пар промышленного отбора на установки генерации сжатого воздуха; 9 — пар от теплофикационных отборов турбины; 10 — теплофикационная установка; 11, 12 — пар теплофикационных отборов соответственно на теплофикационную установку и на установки генерации различных иных производимых энергоносителей (при необходимости); 13 — прямая сетевая вода потребителю; 14 — электроэнергия на установки различных иных производимых энергоносителей (при необходимости); 15 — воздушно-хозяйственное устройство и фильтры очистки воздуха от пыли; 16 — приводная турбина компрессора; 17 — пар от приводной турбины; 18 — первая ступень (секция) компрессора; 19 — промежуточный холодильник; 20 — вторая ступень (секция) компрессора; 21 — концевой холодильник; 22 — влаго- и маслоотделитель; 23 — ресивер; 24 — сжатый воздух потребителю

компрессор 15, ректификационные колонны 24 и 25, а также основной газообменник 19 и внутренняя система охлаждения 20.

Топливо на котельные установки подается по линии 1, воздух — по линии 2. Темпера, получаемая в котельных установках 3, передается паротурбинным установкам 4. Электрическая энергия от генераторов 5 потребителю подается по линии 14. Атмосферный воздух поступает на установку, проходя через фильтр 33, и сжимается компрессором 35. Воздух поступает в блок осуш-

ки 36, затем примеси, такие как водяной пар и углекислый газ, удаляются из воздуха при помощи молекулярного сита 37.

Очищенный воздух в главном газообменнике 19 охлаждается до минус 175 °C. Охлаждение достигается посредством внутреннего теплообмена, в котором потоки холодного газа, произведенного во время процесса, охлаждают сжатый воздух. Быстрый сброс давления заставляет сжатый воздух охлаждаться далее, в результате чего он подвергается частичному сжижению.

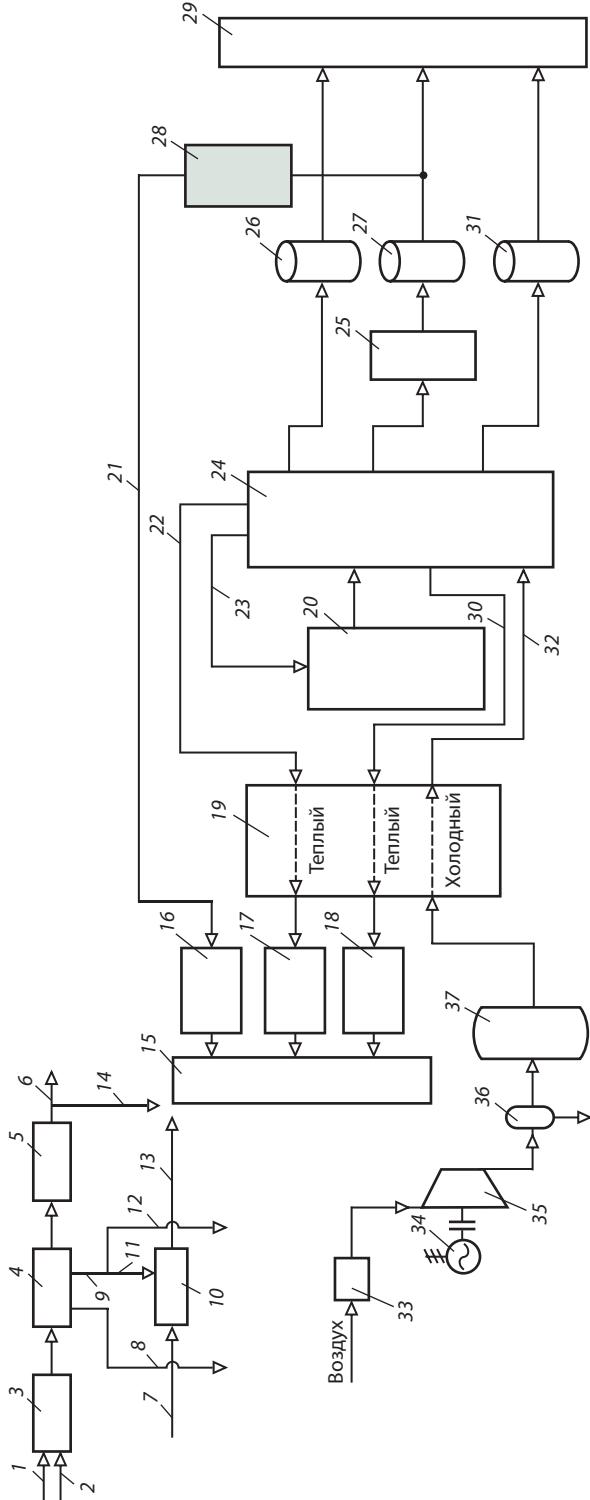


Рис. 5. Схема получения продуктов разложения волокна кинологическим способом на ТЛС-1.

Схема полу-челн промцехов разделяеми воздуха при одиним способом на 13.

1 — топливо; 2 — воздух; 3 — котельные установки; 4 — парогенераторы; 5 — парогенераторы; 6 — электрогенераторы; 7 — парогенераторы; 8 — паромышленного отбора на установки генерации производимых энергоносителей; 9 — парогенераторы; 10 — теплофикационная установка; 11, 12 — пар теплофикационных отборов на теплофикационную установку и на установки генерации производимых энергоносителей; 13 — прямая сетевая вода; 14 — теплофикация на установки генерации производимых энергоносителей; 15 — участок накопленных баллонов или цистерн; 16, 17, 18 — баллоны или цистерны с газообразным аргоном, азотом, кислородом соответственно; 19 — основной газообменник; 20 — внутренняя система охлаждения; 21 — аргон; 22 — азот; 23 — газообразный аргон; 24 — ректификационная колонна № 1; 25 — ректификационная колонна № 2; 26 — жидкий азот; 27 — жидкий аргон; 28 — газификатор; 29 — участок погрузки; 30 — кислород; 31 — жидкий кислород; 32 — частично конденсированный воздух; 33 — фильтр; 34 — привод компрессора; 35 — компрессор; 36 — блок осушки; 37 — цеолитное молекулярное сито

3. Схемы мультигенерационных комплексов для производства энергоносителей и продуктов

Разделение воздуха на чистый кислород, азот и аргон происходит в двух ректификационных колонах (24 и 25). Процесс разделения становится возможным благодаря различным точкам температуры кипения компонентов воздуха. Непрерывное испарение и конденсация, вызванные интенсивным обменом и высокой разностью температур между поднимающимся паром и спускающейся жидкостью, концентрируют чистый азот наверху колоны низкого давления и чистый кислород в ее основании. Аргон 16 отделяется в дополнительном газификаторе 28. Газообразный кислород 18 и азот 17 поступают на участок 15. В жидкой форме кислород, азот и аргон сохраняются в специальных резервуарах и транспортируются клиентам транспортными цистернами 15.

Холод

Для производства холода могут использоваться термотрансформаторы различных типов: парокомпрессионные (ПКТТ), абсорбционные (АБТТ) и воздушные (ВТТ). Для привода ПКТТ и ВТТ необходима электроэнергия. Для обеспечения работы АБТТ требуется поток теплоты, при этом могут быть использованы теплота отборов паротурбинных установок (ПТУ), теплота уходящих газов и т.п. Структурные схемы различных установок для генерации холода на объектах энергетики принципиальных отличий не имеют, так как и электроэнергия, и теплота являются основными произведенными энергоносителями объектов энергетики, используемыми для генерации холода с применением термотрансформаторов.

Необходимо отметить, что термотрансформаторы всех указанных выше типов позволяют при необходимости производить не только холд, но и теплоту. Это в первую очередь относится к ПКТТ и ВТТ. Для одновременной генерации теплоты и холода при работе АБТТ необходимо подавать на него греющую среду определенной температуры.

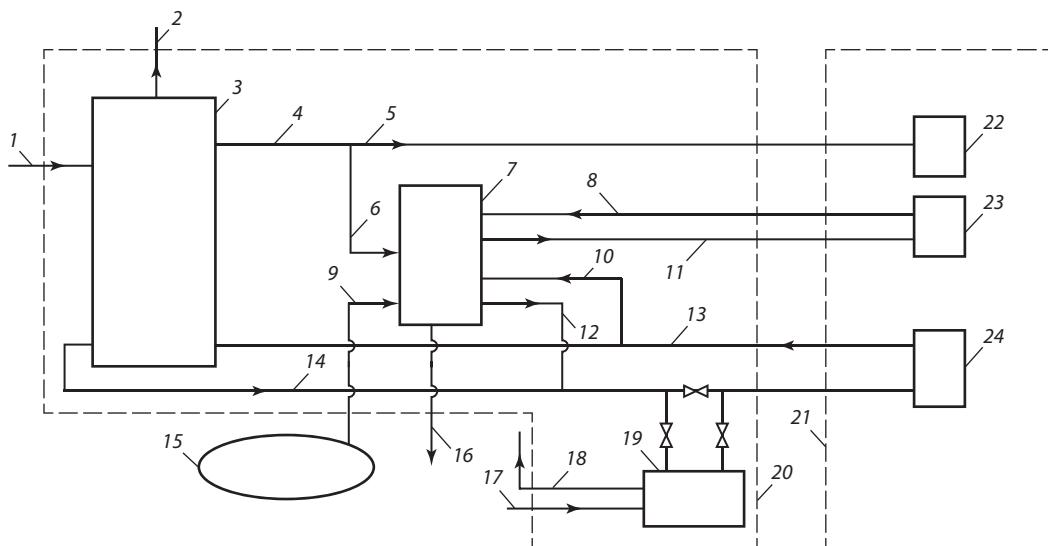
Ниже приведены структурные схемы некоторых, наиболее характерных установок для генерации холода.

Схема хладоснабжения с парокомпрессионным термотрансформатором. Приведенная на рис. 6 структурная схема комплекса, в состав

которого входят ТЭЦ и потребитель, отличается наличием в составе оборудования объекта энергетики для генерации холода (и попутно теплоты) ПКТТ. Таким образом, на этом объекте реализуется технология тригенерации. Следует обратить внимание, что в представленной на рис. 6 схеме отсутствуют связи с внешними электрическими и тепловыми сетями.

В этом случае основными составными элементами объекта 20 малой энергетики являются паротурбинная установка 3 теплофикационного типа, пиковый водогрейный котел 19, а также ПКТТ — термотрансформатор парокомпрессионного типа 7.

Топливо на ПТУ 3 подается по линии 1, уходящие газы отводятся от ПТУ 3 в атмосферу по линии 2. Термотрансформатор 7 предназначен для генерации теплоты и холода (совмещенная генерация). Поток хладона подается на потребляющее холд оборудование 23 по линии 11 и возвращается обратно в термотрансформатор по линии 8. Генерируемая ПКТТ теплота подается в линию основного потока прямой сетевой воды 14 по линии 12 и вместе с ним направляется на теплоснабжение и горячее водоснабжение в теплопотребляющее оборудование 24 потребителя 21. Обратная сетевая вода после теплопотребляющего оборудования направляется по линии 13 частично в ПТУ 3, частично по линии 10 для нагрева в термотрансформатор 7. Электроэнергия отводится от паротурбинной установки 3 по линии 4. Одна часть электроэнергии по линии 5 поступает на оборудование 22, потребляющее электроэнергию на технологии и освещение потребителя 21. Вторая часть электроэнергии (линия 6) используется для привода термотрансформатора 7. В тех случаях, когда потребная холодильная нагрузка меньше суммы потребной тепловой нагрузки и электрической мощности, потребляемой парокомпрессионным термотрансформатором 7, для обеспечения возможности генерации необходимой тепловой нагрузки предусмотрена подача в ПКТТ 7 дополнительной теплоты низкого температурного потенциала из источника 15 по линии 9. Отводится теплота низкого температурного потенциала от термотрансформатора по линии 16. Топливо на ПВК 19 подается по линии 17, уходящие газы отводятся в атмосферу по линии 18.

**Рис. 6.**

Структурная схема энергоснабжения потребителя от объекта малой энергетики с паротурбинной теплофикационного типа и парокомпрессионным термотрансформатором:

1 — топливо на паротурбинную установку; 2 — уходящие газы паротурбинной установки; 3 — паротурбинная установка; 4 — электроэнергия от паротурбинной установки; 5, 6 — электроэнергия соответственно потребителю и на парокомпрессионный термотрансформатор; 7 — парокомпрессионный термотрансформатор; 8 — хладоноситель от установок, потребляющих холод; 9 — теплота низкого температурного потенциала от источника в термотрансформатор; 10 — обратная сетевая вода от потребителя в термотрансформатор; 11 — хладоноситель потребителю; 12 — теплота от термотрансформатора в прямую сетевую воду для потребителя; 13 — обратная сетевая вода от потребителя; 14 — прямая сетевая вода потребителю; 15 — источник теплоты низкого температурного потенциала; 16 — теплота низкого температурного потенциала от термотрансформатора; 17 — топливо на пиковый водогрейный котел (ПВК); 18 — уходящие газы ПВК; 19 — ПВК; 20 — объект малой энергетики; 21 — объект — потребитель энергии; 22 — оборудование, потребляющее электроэнергию на технологии и освещение; 23 — оборудование, потребляющее холод; 24 — теплопотребляющее оборудование

Схема установки для хладоснабжения с использованием для АБТТ теплоты уходящих газов ПТУ. На рис. 7 приведена схема энергоснабжения потребителя от объекта малой энергетики с паротурбинной установкой теплофикационного типа и термотрансформатором абсорбционного типа с использованием в качестве греющей среды для АБТТ теплоты уходящих газов ПТУ.

Основными элементами схемы объекта 19 малой энергетики являются паротурбинная установка 3 теплофикационного типа, пиковый водогрейный котел 18, а также АБТТ — термотрансформатор абсорбционного типа 7. Термотрансформатор предназначен для генерации

и теплоты, и холода в режиме совмещенной генерации. Греющей средой для термотрансформатора 7 служит часть уходящих газов ПТУ, подаваемая в него по линии 4. Уходящие газы отводятся из термотрансформатора по линии 5 в атмосферу.

Принцип функционирования установки, структурная схема которой приведена на рис. 7, заключается в следующем.

Топливо на ПТУ 3 подается по линии 1, уходящие газы отводятся от ПТУ 3 в атмосферу по линии 2. Поток хладона подается на оборудование, потребляющее холод 22 у потребителя 20

3. Схемы мультигенерационных комплексов для производства энергоносителей и продуктов

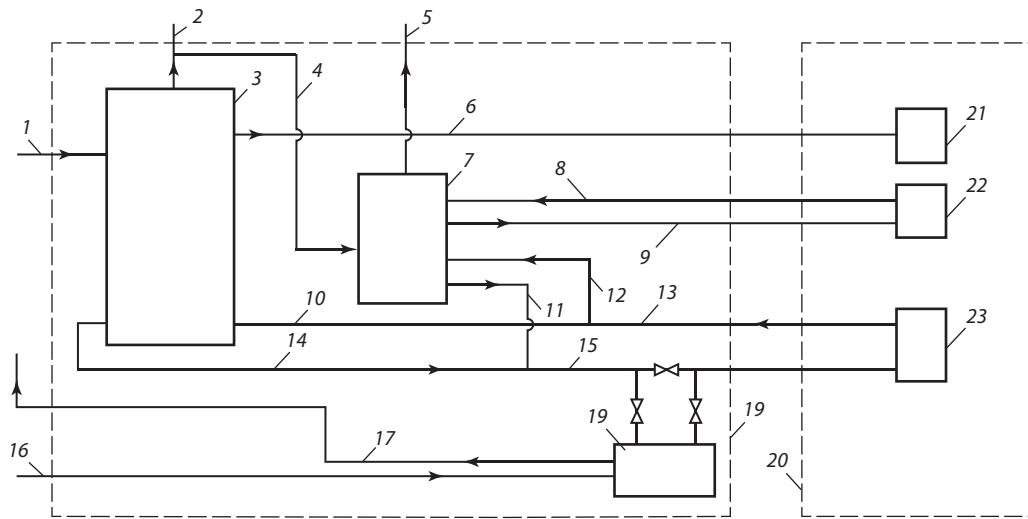


Рис. 7.

Структурная схема энергоснабжения потребителя от объекта малой энергетики с паротурбинной установкой теплофикационного типа и термотрансформатором абсорбционного типа с использованием для обеспечения работы АБТТ уходящих газов ПТУ:

1 — топливо; 2 — уходящие газы ПТУ в атмосферу; 3 — ПТУ; 4 — уходящие газы ПТУ в термотрансформатор абсорбционного типа (АБТТ); 5 — уходящие газы от АБТТ в атмосферу; 6 — электроэнергия от паротурбинной установки потребителю; 7 — АБТТ; 8 — хладоноситель от установок, потребляющих холод; 9 — хладоноситель (хладон) потребителю; 10 — обратная сетевая вода в ПТУ; 11 — теплота от АБТТ в прямую сетевую воду для потребителя; 12 — обратная сетевая вода в АБТТ; 13 — обратная сетевая вода от потребителя; 14 — прямая сетевая вода от ПТУ; 15 — прямая сетевая вода потребителю; 16 — топливо на ПВК; 17 — уходящие газы ПВК; 18 — ПВК; 19 — объект малой энергетики; 20 — объект — потребитель энергии; 21 — оборудование, потребляющее электроэнергию на технологии и освещение; 22 — оборудование, потребляющее холод; 23 — теплопотребляющее оборудование

26

по линии 9 и возвращается обратно в термотрансформатор по линии 8. Прямая сетевая вода отводится от ПТУ по линии 14. Генерируемая термотрансформатором теплота подается в линию основного потока прямой сетевой воды 15 по линии 11 и вместе с ним направляется на теплоснабжение и горячее водоснабжение в теплопотребляющее оборудование 23 потребителя 20. Обратная сетевая вода отводится от теплопотребляющего оборудования на объект малой энергетики 19 по линии 13 и направляется частично в ПТУ 3 по линии 10, частично в термотрансформатор по линии 12. Электроэнергия отводится от паротурбинной установки 3 по линии 6 и подается на оборудование 21, потребляющее электроэнергию на технологические нужды и освещение потребителя 20. Топливо на предусмотренный в схеме ПВК 18 подается по

линии 16, уходящие газы отводятся в атмосферу по линии 17.

Применение в схеме (рис. 7) термотрансформатора абсорбционного типа позволяет использовать для его привода потоки теплоты, в данном случае — теплоты уходящих газов паротурбинной установки (линия 4), которые отводятся из термотрансформатора 7 по линии 5. Это является существенным термодинамическим преимуществом данной схемы по сравнению со схемами с термотрансформаторами парокомпрессионного типа (см. рис. 6), которые требуют электрического либо, в особых случаях, механического привода. Следует отметить, что использование уходящих газов котлов паротурбинных установок создает определенные технические трудности, однако эти трудности вполне преодолимы. Так,

например, на электростанциях в Германии применяются изготовленные из керамических материалов теплообменники, позволяющие отводить уходящие газы котлов с температурами ниже точки росы. Это дает возможность извлекать из уходящих газов теплоту конденсации присутствующих в них водяных паров, а также использовать образующийся при этом конденсат.

Водород

Существующие способы получения водорода представлены в [11]. На ТЭС, использующих в качестве топлива природный газ, возможна организация производства водорода одним из двух способов. Первый из них, самый распространенный и наиболее дешевый, — метод паровой конверсии. Природный газ смешивается с отбираемым из турбины перегретым паром, в результате чего происходит расщепление углеводородов на диоксид углерода и водород. Другой способ — электролиз воды, когда под действием электрического тока происходит расщепление воды на кислород и водород. Ниже приводятся принципиальные схемы реализации того и другого метода.

Схема производства водорода методом паровой конверсии природного газа. На рис. 8 представлена схема производства водорода на ТЭЦ путем паровой конверсии природного газа. Основными элементами объекта генерации ТЭЦ являются котельные установки 3, паротурбинные установки 4 с промышленным и отопительными отборами и электрогенераторы 5. Основными элементами схемы установки производства водорода являются реактор для проведения паровой конверсии природного газа 18, реактор паровой конверсии диоксида углерода 26, узел короткоцикловой адсорбции для выделения водорода 33. Принцип функционирования установки для производства водорода заключается в следующем.

Топливо на котельные установки подается по линии 1, воздух — по линии 2. Теплота, получаемая в котельных установках 3, передается паротурбинным установкам 4. Электроэнергия от генераторов 5 потребителю подается по линии 6. Пар от промышленного отбора 8 и пар от теплофикационных отборов 11 поступают в смеситель 16 для дальнейшего производства водорода,

а пар от теплофикационных отборов по линии 9 поступает на теплофикационную установку 10 для нагрева обратной сетевой воды 7 до температуры прямой сетевой воды 12.

Природный газ по линии 13 поступает на установку производства водорода, где проходит очистку от примесей в 14, после подогревателя природного газа 15 он поступает в смеситель природного газа и пара 16. Далее в реактор паровой конверсии природного газа 18 подаются парогазовая смесь по линии 17, топливо 19 и воздух 20, предварительно подогреваемые за счет теплоты отходящих газов 21 в подогревателе воздуха 22 и подогревателе топлива 23. Полученный синтез-газ с температурой 900—1000 °C по линии подачи синтез-газа 24 поступает от установки производства водорода в паросиловой цикл ТЭЦ для бесконтактного охлаждения. После охлаждения до температуры 250—400 °C охлажденный синтез-газ возвращается в производство водорода по линии 25 и через подогреватель природного газа 15 поступает в реактор паровой конверсии диоксида углерода 26. Полученный газообразный водород по линии подачи 27 поступает на охлаждение в холодильник 28, после чего по линии подачи 29 он поступает в сепаратор 30 для отвода технологического конденсата 31. Затем по линии подачи 32 водород попадает на узел короткоцикловой адсорбции 33, после которого по линии 34 полученный водород отправляется к потребителю.

Схема для производства водорода методом низкотемпературного электролиза воды. Схема получения водорода методом низкотемпературного электролиза воды (щелочной электролиз, электролиз с твердым полимерным электролитом) на ТЭЦ показана на рис. 9.

Основными элементами объекта генерации ТЭЦ являются: котельные установки 3, паротурбинные установки 4 с промышленным и отопительными отборами и электрогенераторы 5. Основными элементами схемы установки производства водорода методом низкотемпературного электролиза являются электролизный модуль 19, система подачи воды на электролизный модуль, которая состоит из дистиллятора воды 16, водяного резервуара 17 и водяного насоса 18. За электролизным модулем расположены системы

3. Схемы мультигенерационных комплексов для производства энергоносителей и продуктов

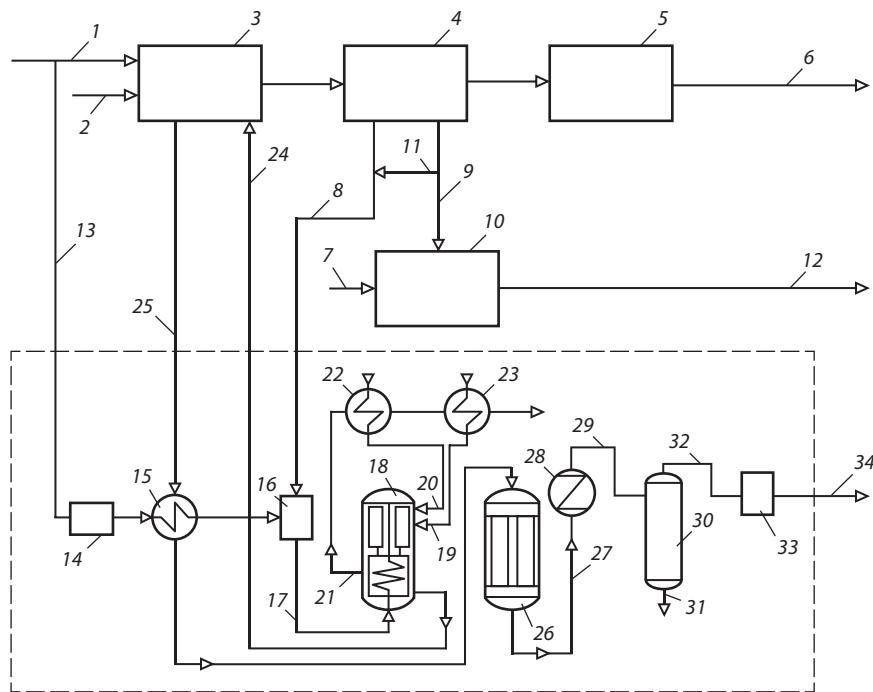


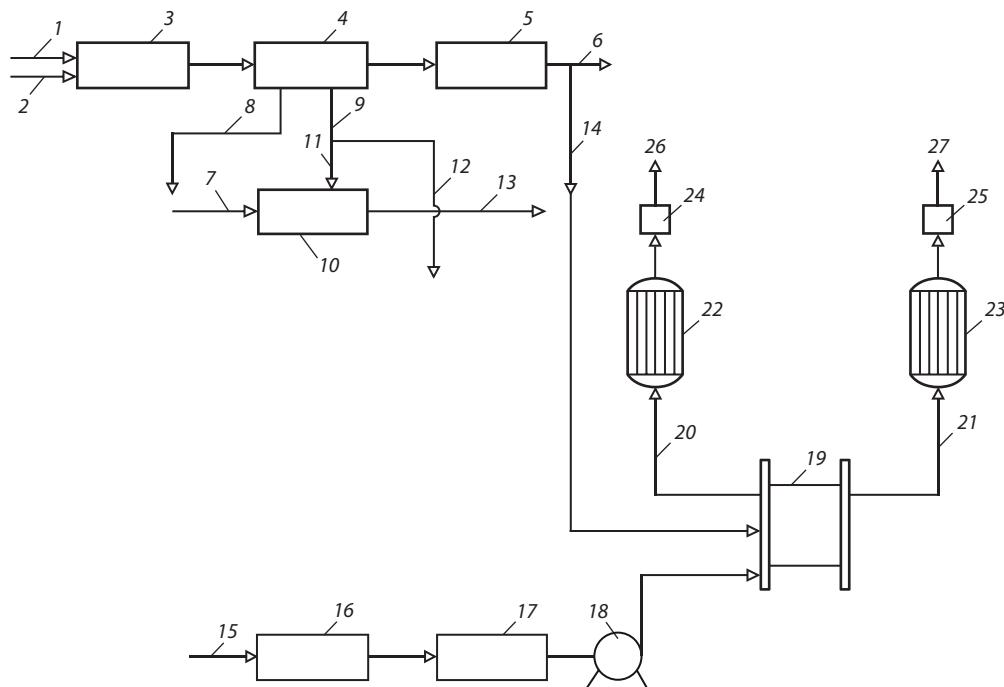
Рис. 8.
Структурная схема производства водорода на ТЭЦ при использовании паровой конверсии природного газа:

1 — топливо; 2 — воздух; 3 — котельные установки; 4 — паротурбинные установки; 5 — электрогенераторы; 6 — электроэнергия потребителю; 7 — обратная сетевая вода; 8 — пар промышленного отбора на установку производства водорода; 9 — пар теплофикационных отборов на теплофикационную установку; 10 — теплофикационная установка; 11 — пар теплофикационных отборов на установку производства водорода; 12 — прямая сетевая вода; 13 — природный газ (ПГ) на установку производства водорода; 14 — очистка ПГ от примесей; 15 — подогреватель ПГ; 16 — смеситель ПГ и пара; 17 — парогазовая смесь в реактор паровой конверсии (ПК) природного газа; 18 — реактор ПКПГ; 19, 20 — соответственно топливо и воздух в реактор ПКПГ; 21 — отходящие газы из реактора ПКПГ; 22, 23 — подогреватель воздуха и топлива соответственно; 24 — синтез-газ от установки производства водорода в паросиловой цикл ТЭЦ для бесконтактного охлаждения; 25 — охлажденный синтез-газ на производство водорода; 26 — реактор ПК диоксида углерода; 27 — газообразного водорода (газ H_2) из реактора ПК диоксида углерода; 28 — холодильник для охлаждения газа H_2 ; 29 — газ H_2 на сепарирование; 30 — сепаратор; 31 — линия отвода технологического конденсата; 32 — газ H_2 на узел короткоцикловой адсорбции; 33 — узел короткоцикловой адсорбции; 34 — водород потребителю

очистки водорода и кислорода, которые состоят из сепараторов кислорода и водорода 22 и 23 и из кислородного и водородного фильтров 24 и 25. Установка работает следующим образом.

Топливо на котельные установки 3 подается по линии 1, воздух — по линии 2. Теплота, получаемая в котельных установках 3, передается паротурбинным установкам 4. Электроэнергия

от генераторов 5 подается потребителю по линии 6. Пар от промышленного отбора 8 предназначен для генерации энергоносителей, а пар от теплофикационных отборов по линии 9 поступает в теплофикационную установку 10 и по линии 12 — на установки генерации иных производимых энергоносителей. В теплофикационной установке 10 обратная сетевая вода, которая поступает по линии 7, подогревается до температу-

**Рис. 9.**

Структурная схема производства водорода при использовании низкотемпературного электролиза на ТЭЦ:

1 — топливо; 2 — воздух; 3 — котельные установки; 4 — паротурбинные установки; 5 — электрогенераторы; 6 — электроэнергия потребителю; 7 — обратная сетевая вода; 8 — пар промышленного отбора на установки генерации энергоносителей; 9 — пар теплофикационных отборов; 10 — теплофикационная установка; 11, 12 — пар теплофикационных отборов соответственно на теплофикационную установку и установки генерации производимых энергоносителей; 13 — прямая сетевая вода; 14 — электроэнергия на установку получения водорода методом электролиза; 15 — вода; 16 — дистиллятор воды; 17 — водяной резервуар; 18 — водяной насос; 19 — электролизный модуль; 20, 21 — кислород и водород соответственно; 22, 23 — соответственно кислородный и водородный сепаратор; 24, 25 — кислородный и водородный фильтр; 26, 27 — кислород и водород потребителю

ры прямой сетевой воды и подается потребителю по линии 13.

Электрическая энергия по линии подачи 14 поступает на электролизный модуль 19, куда подводится вода по линии подачи 15. Вода проходит дистиллятор 16, водяной резервуар 17 и нагнетается водяным насосом 18. Выход кисло-

рода и водорода из электролизного модуля осуществляется по линиям 20 и 21 соответственно. Очищение кислорода происходит в сепараторе 22 и кислородном фильтре 24, и по линии 26 кислород подается потребителю. Очищение водорода происходит в сепараторе 23 и водородном фильтре 25, и по линии 27 водород поступает потребителю.



https://meconstructionnews.com/wp-content/uploads/2020/10/District-Cooling-1_1000x600.jpg

Использование комплекса взаимовостребованных установок позволяет увеличить эффективность технологии мультигенерации

4 Взаимо- востребованные установки



Один из возможных путей реализации технологии мультигенерации связан с полезной утилизацией обычно сбрасываемых в окружающую среду вторичных энергетических ресурсов, возникающих при работе установок, для получения дополнительно производимых энергоносителей или продуктов.

В крупных промышленных комплексах имеются вторичные энергетические ресурсы (ВЭР), различающиеся как видом, так и параметрами, например горючие газы, горячая или холодная вода. Существуют ситуации, когда параметры ВЭР, образующихся при работе одной из установок комплекса, соответствуют параметрам первичного энергетического ресурса, необходимого для работы другой установки, у которой, в свою очередь, есть собственные ВЭР, годящиеся для использования в первой установке. Таким образом, для повышения эффективности эксплуатации первой установки требуется организация ее совместной работы со второй, а повышение эффективности эксплуатации второй установки требует организации ее совместной работы с первой. Это позволяет для такого рода сочетания установок ввести понятие взаимовостребованных установок (ВВУ).

Установки являются взаимовостребованными, если ВЭР первой из них используются как частичная первичная энергия для организации работы второй установки, при этом ВЭР второй установки используются как частичная первичная энергия для организации работы первой [12].

Простейшая схема с двумя ВВУ приведена на рис. 10. Изначально выбрасываемые в окружающую среду ВЭР установки I (линия 5) поступают в установку II, где полезно используются для повышения энергетической эффективности ее работы, а изначально теряемые в окружающую среду энергетические выбросы установки II (линия 6) полезно используются для повышения энергетической эффективности работы установки I. При этом расход первичных энергетических ресурсов, поступающих в эти установки по линиям 3 и 4, может быть уменьшен, а в некоторых случаях даже и прекращен, когда вторичных энергетических ресурсов, поступающих в установку, достаточно для обеспечения ее работоспособности.

Возможны также случаи создания ВВУ, включающих в себя не две, а большее количество установок, входящих в один либо несколько параллельно работающих технологических комплексов.

Особый интерес при построении ВВУ могут представлять детандер-генераторные агрегаты (ДГА). Поступающий по магистральным трубопроводам газ, как правило, имеет давление, избыточное для использования в технологических установках. Обычно понижение давления происходит при дросселировании газа. При этом

4. Взаимовостребованные установки

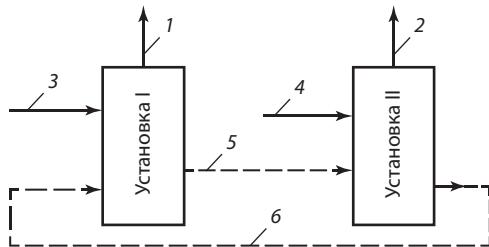


Рис. 10.
Схема двух взаимовостребованных установок:
 1, 2 — продукция установки I и II соответственно; 3, 4 — первичная энергия установки I и II; 5 — линия подачи ВЭР1 из установки I в установку II; 6 — линия подачи ВЭР2 из установки II в установку I

часть его энергии, связанная с давлением газа, теряется. ДГА, состоящий из детандера и электрогенератора, позволяет полезно использовать механическую энергию сжатого газа. При работе ДГА производится электроэнергия, а температура газа заметно понижается, вырабатывается холд. Для нормальной эксплуатации ДГА требуется подогрев газа либо перед детандером, либо после него. Эти особенности позволяют легко представить ДГА в составе ВВУ. Примерная схема такой ВВУ приведена на рис. 11.

Основными элементами взаимовостребованной установки являются компрессорная установка, ДГА и объединяющие их в единый комплекс два теплообменника (7 и 14). В состав ДГА входят детандер 9 и электрогенератор 10. В состав компрессорной установки входят компрессор 19 и электродвигатель 20. Оба теплообменника являются составными элементами как ДГА, так и компрессорной установки. Один из теплообменников (7) предназначен для подогрева газа перед детандером 9 и охлаждения перед подачей потребителю сжатого воздуха после компрессора 19. Второй теплообменник (14) предназначен для охлаждения воздуха перед компрессором 19 с одновременным нагревом газа, направляемого потребителю (линии 11 и 4).

Принцип действия установки следующий. Поток газа высокого давления, поступающий на станцию технологического уменьшения давле-

ния (СТУД) транспортируемого газа по линии 1, разделяется на две части. Одна из частей потока газа по линии 2 направляется к дросселирующему устройству 3, где его давление уменьшается до необходимого по условиям эксплуатации газоиспользующего оборудования, после чего поступает в линию 4 отвода газа низкого давления из СТУД потребителю. Вторая часть газа высокого давления по линии 6 поступает в теплообменник 7, где происходит подогрев этого потока газа за счет теплоты воздуха высокого давления, направляемой в этот теплообменник из компрессора 19 по линии 13. После подогрева в теплообменнике 7 газ по линии 8 направляется в детандер 9 ДГА, а отдавший часть теплоты воздух по линии 5 отводится потребителю.

Поток газа, часть энергии которого в детандере 9 преобразуется в механическую работу, в результате чего его давление снижается до необходимого по условиям эксплуатации газоиспользующего оборудования, а температура уменьшается, отводится из детандера 9 по линии 16 в теплообменник 14. В этот же теплообменник 14 по линии 15 направляется поток воздуха из атмосферы с начальным давлением и более высокой температурой, чем температура потока газа на входе в теплообменник. В теплообменнике 14 происходит охлаждение потока воздуха, после чего этот поток поступает на сжатие в компрессор 19, а газ из теплообменника 14 по линии 11 направляется в линию 4 отвода газа низкого давления из ГРП потребителю.

Поток сжатого воздуха отводится из компрессора 19 по линии 18. В схеме установки предусмотрена возможность отвода части потока сжатого воздуха из линии 18 по линии 12 непосредственно в линию 5 для подачи сжатого воздуха потребителю в обход теплообменника 7, предназначенного для подогрева газа перед детандером ДГА. Это позволяет при необходимости регулировать как температуру подогрева газа в теплообменнике 7, так и температуру воздуха в линии 5.

Механическая работа, произведенная потоком газа в детандере 9 ДГА, преобразуется в электроэнергию, которая отводится из него по линии 22. В тех случаях, когда электрическая мощность ДГА превышает необходимую для обеспечения работы компрессора, одна часть

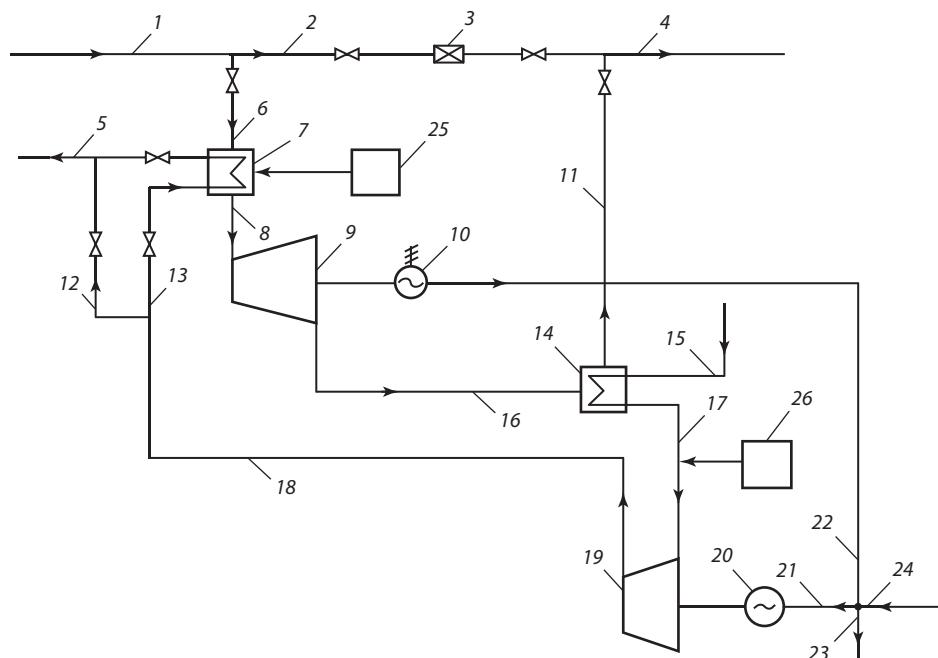
**Рис. 11.**

Схема взаимовостребованной установки на базе одноступенчатого ДГА и одноступенчатого компрессора с электроприводом:

1 — газ высокого давления (в.д.) на входе на газораспределительный пункт (ГРП); 2 — газ в.д. к дросселирующему устройству ГРП; 3 — дросселирующее устройство ГРП; 4 — газ низкого давления (н.д.) из ГРП потребителю; 5 — сжатый воздух потребителю; 6 — газ в.д. в теплообменник подогрева газа перед детандером ДГА; 7 — теплообменник подогрева газа перед детандером ДГА и охлаждения воздуха после компрессора; 8 — газ в.д. в детандер ДГА; 9 — детандер ДГА; 10 — электрический генератор ДГА; 11 — подача газа н.д. в газопровод н.д. на выходе из ГРП; 12 — сжатый воздух после компрессора в теплообменник подогрева газа перед детандером ДГА; 13 — сжатый воздух после компрессора в теплообменник подогрева газа после детандера ДГА и охлаждения воздуха перед компрессором; 14 — теплообменник подогрева газа после детандера ДГА и охлаждения воздуха перед компрессором; 15 — воздуха в теплообменник подогрева газа после детандера ДГА и охлаждения воздуха перед компрессором; 16 — газ из детандера ДГА; 17 — воздух в компрессор; 18 — воздух из компрессора; 19 — компрессор; 20 — электродвигатель; 21 — электроэнергия на электродвигатель; 22 — электроэнергия от электрогенератора ДГА; 23 — электроэнергия потребителю; 24 — электроэнергия из сети; 25, 26 — внешний источник теплоты и холода соответственно

выработанной генератором 10 электроэнергии отводится из линии 22 по линии 21 на электродвигатель 20 компрессора 19, вторая часть отводится из линии 22 по линии 23 потребителю. В тех же случаях, когда электрическая мощность ДГА не достаточна для обеспечения работы компрессора, предусмотрен подвод дополнительной электроэнергии из сети по линии 24. В схеме предусмотрены также автономные источники теплоты 25 и холода 26. Они предназначены для

обеспечения необходимых температур газа высокого давления и воздуха высокого давления в тех случаях, когда оказывается невозможным сделать это в теплообменниках 7 и 14 только за счет соответственно теплоты воздуха после компрессора и холода газа после детандера.

Повышение термодинамической эффективности работы компрессорной установки происходит в результате уменьшения температуры

воздуха, направляемого в компрессор 19 для сжатия, с использованием для этого имеющего низкую температуру потока газа после детандера 9 (детандер-генераторный агрегат генерирует также электроэнергию для привода компрессора). В свою очередь, для обеспечения необходимых по технологическим требованиям параметров работы ДГА необходим подогрев газа в теплообменнике 7 перед детандером, для чего используется вторичный энергетический ресурс компрессора — теплота потока сжатого газа (в данном случае воздуха, линия 18-13).

Очевидно, что установка, схема которой приведена на рис. 11, является взаимовостребованной. Вторичный энергетический ресурс детандера (поток холода 16) играет роль первичного энергоносителя для организации работы компрессора, а вторичный энергетический ресурс компрессора (поток теплоты 13) выполняет функцию первичного энергоносителя для организации работы ДГА.

В тех случаях, когда потоки энергии от ДГА (электроэнергия и холод) и компрессора (теплота) полностью используются внутри объединяющей их схемы, установка превращается в своеобразный преобразователь энергии потока газа в энергию потока воздуха. При этом внешние по отношению к схеме источники электроэнергии, теплоты и холода (рис. 11) не требуются. Эффективность этого преобразования будет определяться значениями КПД детандера, электрогенератора и компрессора, а также потерями теплоты и холода в окружающую среду. В идеале уменьшение энергии потока газа должно в точности соответствовать увеличению энергии потока воздуха.

Таким образом, применение комплекса взаимовостребованных установок позволяет увеличить эффективность технологии мультигенерации за счет взаимного использования вторичных энергетических ресурсов установок, входящих в состав комплекса БВУ.



Заключение

1. Исследования, проведенные зарубежными и российскими учеными, показали возможность повышения термодинамической и экономической эффективности работы электростанций при использовании на них технологии мультигенерации — одновременного производства на одном объекте генерации не менее двух энергоносителей и иных полезных продуктов.

2. Концепция мультигенерации отличается универсальностью. Ее реализация возможна для различных видов первичной энергии (органическое топливо, атомная энергия, гидроэнергия, возобновляемые источники). Весьма широким оказывается перечень получаемых потоков энергии и полезных продуктов.

3. Многие из технологий, применяемых в настоящее время на энергетических объектах или планируемых к использованию, подпадают под понятие мультигенерации, начиная от совместного производства электроэнергии и тепла (когене-

рации) и заканчивая перспективными установками с кислородным сжиганием топлива. Вместе с тем практических примеров осознанных решений по созданию мультигенерационных комплексов не так много, если не считать когенерационные установки.

4. Решение вопроса о внедрении технологии мультигенерации на объектах энергетики в каждом конкретном случае требует проведения глубоких исследований с учетом большого количества условий, в которых работают как объект генерации, так и промышленные предприятия — предполагаемые получатели потоков энергии и промышленных продуктов.

5. Представляет интерес один из вариантов реализации мультигенерации, когда вторичные энергетические ресурсы, образующиеся при работе одной из установок, могут быть использованы как первый энергетический ресурс для обеспечения работы другой установки и наоборот.



Список использованной литературы

1. **Кейко А.В.** Системы накопления энергии / А.В. Кейко, С.П. Филиппов // Бюллетень «Энергетика, экология, энергосбережение» / под ред. А.В. Клименко. 2025. Вып. 2. 37 с. ISBN 978-5-383-01738-8
2. **Очкив В.Ф.** Сохранение и развитие тепловых электростанций, или п-генерация / В.Ф. Очков // Энергосбережение и водоподготовка. 2017. № 1 (105). С. 50—61.
3. **Технологии** кислородного сжигания топлива — будущие технологии экологически чистой энергетики / М.В. Синкевич, А.А. Косой, А.С. Косой, О.С. Попель // Бюллетень «Энергетика, экология, энергосбережение» / под ред. А.В. Клименко. 2024. Вып. 2. 36 с. ISBN 978-5-383-01715-9
4. **Mancarella P.** MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models / P. Mancarella // Energy. 2014. Vol. 65 P. 1—17. DOI: 10.1016/j.energy.2013.10.041
5. **Polygeneration** as a future sustainable energy solution — A comprehensive review / K. Jana, A. Ray, M.M. Majoumerd [et al.] // Applied Energy. 2017. Vol. 202. P. 88—111. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.05.129
6. **Клименко А.В.** Совместная генерация произведенных энергоносителей (обзор) / А.В. Клименко, В.С. Агабабов, П.Н. Борисова // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 2. С. 6—29. DOI: 10.18721/JEST.25201
7. **Особенности** комбинированного производства электроэнергии, тепла и холода на базе парогазовой установки / А.В. Клименко, В.С. Агабабов, А.А. Рогова, П.А. Тидеман // Теплоэнергетика. 2015. № 3. С. 11—15. DOI: 10.1134/S0040363615030042
8. **Тувальбаев Б.Г.** Работа ТЭС в постоянном режиме с выработкой дополнительной продукции на невостребованной энергии / Б.Г. Тувальбаев, В.И. Моисеев // Энергосбережение и водоподготовка. 2013. № 4 (84). С. 24—27.
9. **Гашо Е.Г.** Предпосылки и приоритеты климатической адаптации Москвы / Е.Г. Гашо, М.Ю. Колосов, А.А. Кролин // Бюллетень «Энергетика, экология, энергосбережение» / под ред. А.В. Клименко. 2024. Вып. 1. 41 с. ISBN 978-5-383-01714-2
10. **Аминов Р.З.** Оценка ресурсных и экономических показателей работы паротурбинных блоков ТЭС при переменных режимах / Р.З. Аминов, А.Ф. Шкрет, М.В. Гаринский // Теплоэнергетика. 2016. № 8. С. 25—31. DOI: 10.1134/S0040363616080014
11. **Кулагин В.А.** Водородная энергетика: за и против / В.А. Кулагин, Д.А. Грушевенко // Бюллетень «Энергетика, экология, энергосбережение» / под ред. А.В. Клименко. 2023. Вып. 2. 36 с. ISBN 978-5-383-01683-1
12. **Взаимовостребованные** установки — частный случай использования вторичных энергетических ресурсов / А.В. Клименко, В.С. Агабабов, С.Н. Петин, В.А. Филиппов // Промышленная энергетика. 2022. № 6. С. 2—8. DOI: 10.34831/EP.2022.64.94.001

Научно-популярное издание

ЭНЕРГЕТИКА, ЭКОЛОГИЯ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

Под редакцией академика РАН Александра Викторовича Клименко

Выпуск 4

АГАБАБОВ Владимир Сергеевич

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ МУЛЬТИГЕНЕРАЦИИ

Оригинал-макет подготовлен АО «Издательский дом МЭИ»

Подписано в печать 15.12.2025. Формат 60×90/8. Усл. печ. л. 4,5

Контакты издателя: Инженерное управление ПАО «Мосэнерго».

Тел.: +7 (495) 957-19-57, доб. 30-94.

Электронная почта: staroverovaaa@mosenergo.ru

Управление по работе со СМИ и органами власти ПАО «Мосэнерго».

Тел.: 8 (495) 957-19-57, доб. 22-90, 37-17.

Электронная почта: press-centre@mosenergo.ru.

Адрес в Интернете: www.mosenergo.ru

