

Петрущенко В.А., к.т.н., главный инженер ЗАО “НЕВЭНЕРГОПРОМ-ПЛЮС”,
Васькин В.В., технический директор ЗАО “НЕВЭНЕРГОПРОМ-ПЛЮС”

Тепловые схемы мини-ТЭЦ на базе противодавленческих паровых турбин, применяемые в рабочих проектах

В последнее десятилетие рядом проектных организаций выполнены рабочие проекты строительства мини-ТЭЦ с использованием противодавленческих паровых турбин. Под мини-ТЭЦ в настоящей статье понимается вновь сооружаемый машзал с турбоагрегатами и необходимым теплообменным, насосным и иным вспомогательным оборудованием. Себестоимость электроэнергии, вырабатываемой на мини-ТЭЦ при использовании природного газа в качестве основного топлива, в 2–5 раз меньше в сравнении с ценой электроэнергии, закупаемой у энергосистемы в различных регионах России. В настоящей статье приводится классификация тепловых схем, примененных в рабочих проектах мини-ТЭЦ на базе существующих котельных, имеющих в своем составе паровые котлы.

Применение паровых противодавленческих турбин целесообразно в промышленных и отопительных котельных с низкими параметрами пара (1,4 МПа, 194–250 °С) при наличии тепловых нагрузок в виде систем отопления, вентиляции, горячего водоснабжения общей мощностью в десятки и сотни мегаватт. При небольших расходах технологического пара давлением 0,6–1,3 МПа, а также давлении насыщенного пара для технологических процессов до 0,5 МПа установка противодавленческих паровых турбин также экономически выгодна. Это связано с тем, что параметры пара от котлов и после турбин позволяют производить отпуск теплоты потребителям в необходимом количестве при одновременной выработке электроэнергии на тепловом потреблении, то есть реализовать теплофикацию.

Тепловая схема мини-ТЭЦ на основе противодавленческих паровых турбин и ее структурная связь с тепловой схемой котельной зависят от вида и ве-

личины тепловых нагрузок потребителей, типа системы теплоснабжения и оборудования, применяемого в котельной.

Открытые системы теплоснабжения. Тепловая нагрузка ГВС относительно стабильна в течение года. Низкий потенциал горячей воды, температура которой в процессе приготовления изменяется от 5–15 до 70 °С, позволяет выбирать противодавление турбины величиной 0,1–0,2 МПа, что существенно увеличивает мощность турбины при заданной тепловой нагрузке ГВС в сравнении с более высокими значениями противодавления на уровне 0,5–0,7 МПа. Равномерный характер электрической нагрузки турбин в течение суток обеспечивается за счет использования аккумуляторных баков горячей воды.

На рис. 1–4 показаны тепловые схемы мини-ТЭЦ и их связь с паровой частью котельной для открытых систем теплоснабжения с атмосферными деаэраторами (рис. 1–3) и с вакуумными деаэраторами (рис. 4). При формировании тепловых схем и организации режимов работы мини-ТЭЦ необходимо иметь в виду, что эффективная деаэрация в атмосферном деаэраторе имеет место при температуре подаваемой подпиточной воды не менее 64 °С, в вакуумном деаэраторе – не менее 40 °С. Возможно также сохранение режима работы атмосферных деаэраторов при вводе в работу мини-ТЭЦ таким же, как и при работе только котельного оборудования.

В схеме, изображенной на рис. 1, пар после турбины подается в атмосферный деаэратор и в пароводяной подогреватель подпиточной воды котельной. В этом случае нагрев подпиточной воды в деаэраторе паром после турбины не должен быть более, чем 40 °С, температура подпиточной воды на входе в деаэратор – не менее 64 °С. Следует иметь в виду, что обычно в пароводяные теплообменники котельной подается пар при давлении 0,6 МПа и температуре 154 °С. При меньших давлениях пара температурный напор между паром и

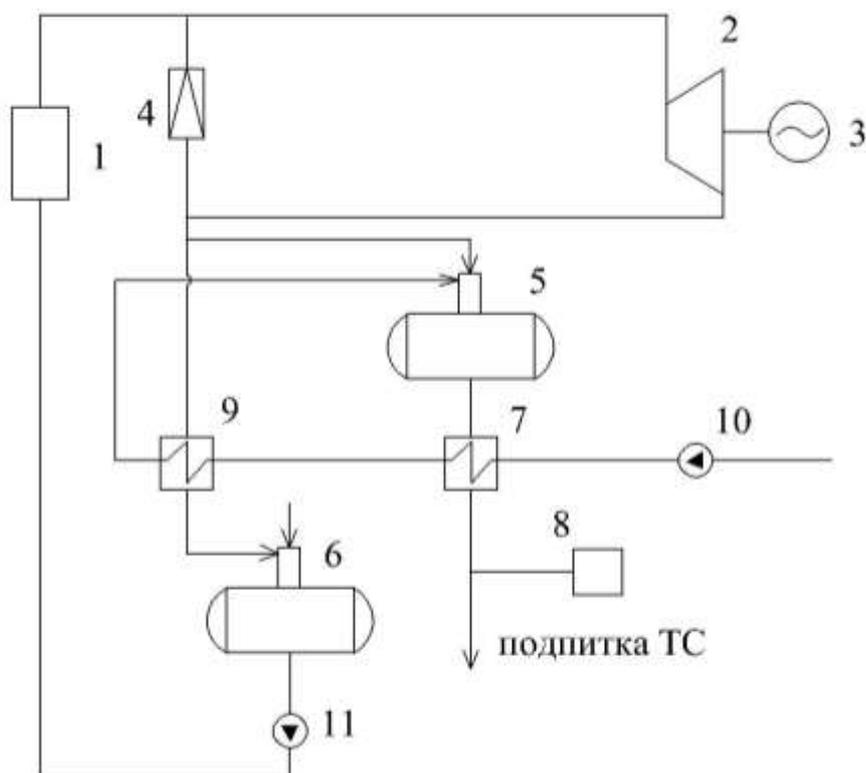


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема подключения мини-ТЭЦ к паровой части котельной с атмосферными деаэраторами для открытой системы теплоснабжения при использовании теплообменного оборудования котельной:

1 - паровой котел, 2 - паровая турбина, 3 - электрогенератор, 4 - редукционно-охладительная установка котельной, 5 - подпиточный деаэрактор, 6 - питательный деаэрактор, 7 - охладитель деаэрированной воды, 8 - аккумуляторный бак горячей воды, 9 - пароводяной подогреватель подпиточной воды котельной, 10 - насос сырой воды, 11 - питательный насос.

водой уменьшается, нагрев подпиточной воды снижается, потери давления в паровом тракте теплообменника котельной резко возрастают.

Кроме того, при расстоянии в десятки или сотни метров между турбиной и котельной и противодавлении 0,12-0,2 МПа затруднительно трассировать паропровод от турбины до деаэрактора и теплообменников в условиях существующей котельной в связи с большими размерами паропровода. Например, для турбогенератора мощностью 3,5 МВт при расходе пара через турбину 46 т/час диаметр паропровода после турбины равен 830 мм.

В связи с этим при реализации схемы, изображенной на рис.1, используют более высокое противодавление, например, на мини-ТЭЦ 2-й Пушкинской котельной ЗАО "Лентеплоснаб" (проектировщики ООО "Пластполимер – проектная часть", ОАО "Ленэнерго"), где установлен турбоагрегат производства ОАО "Пролетарский завод", его величина равна 0,4-0,5 МПа. Увеличение про-

тиводавления привело к снижению мощности установленного турбоагрегата до 1,5 МВт.

В схеме на рис. 2 пар после турбины подается в пароводяные теплообменники, устанавливаемые в машзале мини-ТЭЦ рядом с турбиной. Площадь поверхности теплообмена выбирается исходя из наименьшего противодействия для выпускаемых турбин, равного 0,12 МПа. Для охлаждения теплообменников мини-ТЭЦ используется подогретая подпиточная вода после охладителей деаэрированной воды (ОДВ), имеющая температуру на входе в теплообменники около 40–50 °С. После подогрева паром от турбин на 35–40 °С подпиточная вода подается в деаэратор. В этом случае пароводяные теплообменники котельной выводятся из работы и выполняют роль резерва. Применение теплообменников машзала, работающих на паре давлением 0,1-0,2 МПа, позволяет значительно увеличить мощность устанавливаемой турбины. В рабочих проектах мини-ТЭЦ 1-й и 2-й Правобережных котельных, 2-й Ломоносовской котельной ГУП “ТЭК СПб” (проектировщик ЗАО “НЕВЭНЕРГОПРОМ-ПЛЮС”), имеющих тепловые

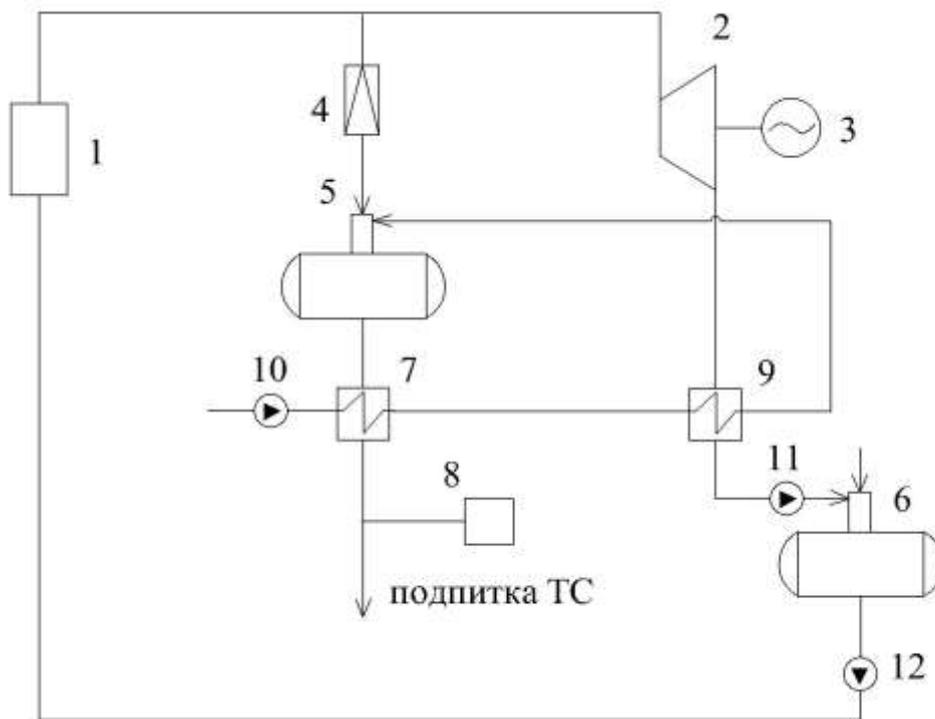


Рис. 2. Принципиальная тепловая схема подключения мини-ТЭЦ к паровой части котельной с атмосферными деаэраторами для открытой системы теплоснабжения с размещением в машзале парового турбоагрегата, пароводяных подогревателей подпиточной воды, догревающих сырую воду после ОДВ, и конденсатных насосов:
 1 - паровой котел, 2 - паровая турбина, 3 - электрогенератор, 4 - редукционно-охладительная установка котельной, 5 - подпиточный деаэратор, 6 - питательный деаэратор, 7 - ОДВ, 8 - аккумуляторный бак горячей воды, 9 - пароводяной подогреватель подпиточной воды машзала, 10 - насос сырой воды, 11 - конденсатный насос, 12 - питательный насос.

мощности в 2 раза больше в сравнении со 2-й Пушкинской котельной, за счет снижения противодавления мощность турбогенератора повышена с 1,5 до 3,5-4 МВт.

На рис. 3 показана тепловая схема, в которой теплообменники мини-ТЭЦ охлаждаются исходной подпиточной водой или водой после фильтров химводоочистки, имеющей температуру 5–30 °С. После подогрева до 40–60 °С подпиточная вода направляется в ОДВ котельной. В результате уменьшения температурного напора между подпиточной и деаэрированной водой тепловая мощность ОДВ уменьшается и требуется их реконструкция с увеличением площади поверхности теплообмена в 2 раза. Для рассматриваемой тепловой схемы площадь поверхности теплообмена пароводяных теплообменников

машзала приблизительно в 2 раза меньше в сравнении с предыдущим вариантом.

Сравнительный анализ рассмотренных вариантов тепловых схем показывает, что тепловая схема, представленная на рис. 2, не требует работ по реконструкции котельной, кроме врезок трубопроводов, позволяет в любой момент вернуться к работе по существующей тепловой схеме котельной, обеспечивает максимальную электрическую мощность мини-ТЭЦ. В связи с этим она представляется наиболее удачной для применения при строительстве мини-ТЭЦ на котельных, работающих в открытой системе теплоснабжения. Именно такая схема выбрана для мини-ТЭЦ Приморской котельной (1-я очередь), 1-й и 2-й Правобережных, 2-й Ломоносовской котельных ГУП "ТЭК СПб" (проектировщик ЗАО "НЕВЭНЕРГОПРОМ-ПЛЮС").

На рис. 4 показана тепловая схема мини-ТЭЦ для открытых систем теплоснабжения с вакуумными деаэраторами. В вакуумный деаэратор поступают греющий поток с температурой 130–150 °С, приготовленный в пароводяных теплообменниках котельной в межотопительный период за счет нагрева паром от РОУ котельной или в водогрейных котлах в отопительный период, и нагреваемый поток подпиточной воды с температурой 60 °С. Поток подпиточной во-

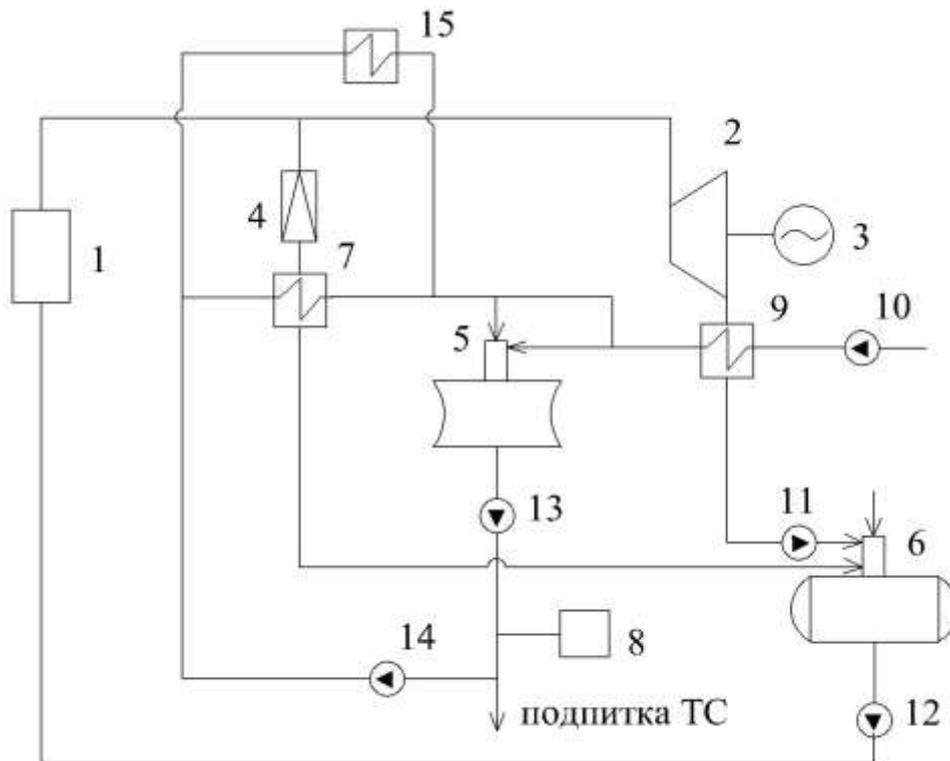


Рис. 4. Принципиальная тепловая схема подключения мини-ТЭЦ к паровой части котельной с вакуумными деаэраторами для открытой системы теплоснабжения с размещением в машзале парового турбоагрегата, пароводяных подогревателей подпиточной воды и конденсатных насосов:

1 - паровой котел, 2 - паровая турбина, 3 - электрогенератор, 4 - редукционно-охладительная установка котельной, 5 - подпиточный вакуумный деаэратор, 6 - питательный деаэратор, 7 - пароводяной подогреватель котельной для создания греющего потока вакуумного деаэратора, 8 - аккумуляторный бак горячей воды, 9 - пароводяной подогреватель сырой воды машзала, 10 - насос сырой воды, 11 - конденсатный насос, 12 - питательный насос, 13 - подпиточный насос, 14 - циркуляционный насос греющей воды, 15 - водогрейный котел.

ды с исходной температурой 5–15 °С нагревается до ~ 50 °С в пароводяных теплообменниках машзала мини-ТЭЦ и далее догревается до 60 °С за счет смешения с частью греющего потока.

Следует отметить, что расход греющего потока в схеме мини-ТЭЦ приблизительно в 3 раза меньше, в сравнении со схемой котельной. Это связано с предварительным подогревом подпиточной воды в теплообменниках мини-ТЭЦ. Такая тепловая схема выбрана для мини-ТЭЦ Приморской котельной (2-я очередь) и Коломяжской котельной ГУП "ТЭК СПб" (проектировщик ЗАО "НЕВЭНЕРГОПРОМ-ПЛЮС"). Она также не требует реконструкции котельной, кроме врезок трубопроводов.

Принципиально возможна работа вакуумного деаэратора на паре от турбин в качестве греющего потока. Однако работа вакуумного деаэратора в новых

условиях требует согласования с его режимными характеристиками и заводом-изготовителем.

На мини-ТЭЦ котельных открытых систем теплоснабжения могут устанавливаться две группы пароводяных теплообменников с параллельным подключением по паровому потоку после турбин. Первая группа теплообменников охлаждается нагреваемой подпиточной водой в соответствии со схемами, рассмотренными выше, вторая группа теплообменников работает на обратной сетевой воде в соответствии со схемами, приведенными ниже. Возможно также использование подпиточной или сетевой воды для конденсации пара в одной и той же группе установленных пароводяных теплообменников машзала мини-ТЭЦ за счет переключения, предусмотренного в тепловой схеме. Оба варианта были реализованы в рабочих проектах ЗАО "НЕВЭНЕРГОПРОМ-ПЛЮС" на мини-ТЭЦ названных выше 5-и котельных ГУП "ТЭК СПб".

Закрытые системы теплоснабжения. Для закрытых систем теплоснабжения могут быть рекомендованы тепловые схемы мини-ТЭЦ, представленные на рис. 5–8. Эти схемы аналогичны рассмотренным выше, но для охлаждения пара после турбины используется обратная сетевая вода. В схемах на рис. 5-7 пароводяные теплообменники машзала подключаются последовательно с водогрейными котлами, так как только в этом случае можно сохранить расчетный температурный график регулирования тепловой нагрузки системы теплоснабжения. В первом варианте (рис. 5) вся обратная сетевая вода тепловой магистрали проходит через теплообменники мини-ТЭЦ (мини-ТЭЦ ОАО "Вологодский оптико-механический завод", проектировщик ЗАО "НЕВЭНЕРГОПРОМ-ПЛЮС"), во втором варианте (рис. 6) – только ее часть (мини-ТЭЦ Приморской котельной ГУП "ТЭК СПб", 1-я очередь, проектировщик ЗАО "НЕВЭНЕРГОПРОМ-ПЛЮС"). В обоих случаях пароводяные теплообменники машзала подключаются к тепловой сети без использования сетевых насосов машзала.

На рис. 7 показана тепловая схема мини-ТЭЦ с подкачивающими сетевыми насосами. Такая схема применена на мини-ТЭЦ ОАО "Стройэнерго", (г. Череповец, проектировщик ЗАО "НЕВЭНЕРГОПРОМ-ПЛЮС").

На рис. 8 представлена тепловая схема мини-ТЭЦ с параллельным подключением теплообменников машзала и водогрейных котлов. Такая схема не требует установки дополнительных сетевых насосов, однако мощность теплового источника в этом случае снижается в связи с невозможностью значительного изменения расхода сетевой воды и падением температуры сетевой воды в подающей линии тепловой сети. Такая схема применена на мини-ТЭЦ ОАО "Вологодский станкозавод" (проектировщик ЗАО "НЕВЭНЕРГОПРОМ-ПЛЮС") и ОАО "Уральская кузница" (г. Чебаркуль, проектировщик ЗАО "Энергорезерв-сервис"), а также рассматривалась в качестве одного из вариантов на названных выше 5-и котельных ГУП "ТЭК СПб".

Эта же схема может быть использована в качестве резервной для открытой системы теплоснабжения. При переходе на закрытую систему теплоснабжения теплообменники сетевой и подпиточной воды будут охлаждаться сетевой водой с обеспечением номинального расхода пара через турбины.

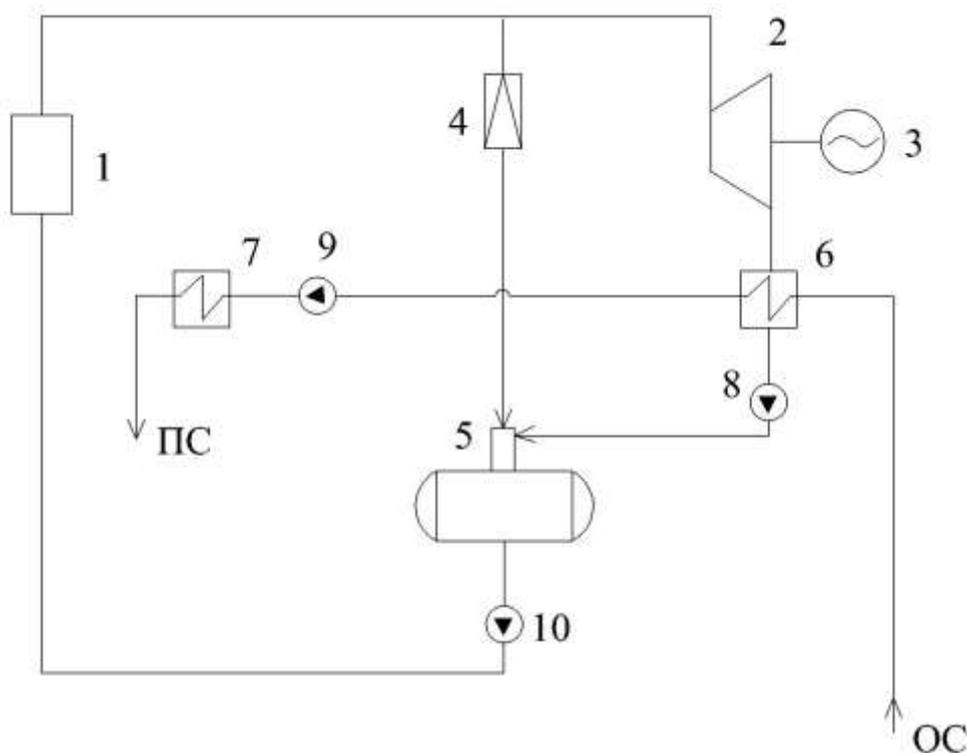


Рис. 5. Принципиальная тепловая схема подключения мини-ТЭЦ к паровой части котельной с атмосферными деаэраторами для закрытой системы теплоснабжения с размещением в машзале парового турбоагрегата, пароводяных подогревателей всего потока сетевой воды и конденсатных насосов:

1 - паровой котел, 2 - паровая турбина, 3 - электрогенератор, 4 - редуционно-охладительная установка котельной, 5 - питательный атмосферный деаэратор, 6 - пароводяной подогреватель сетевой воды машзала, 7 - водогрейный котел, 8 - конденсатный насос машзала, 9 - сетевой насос котельной, 10 - питательный насос, ПС, ОС - подающая и обратная линии тепловой сети.

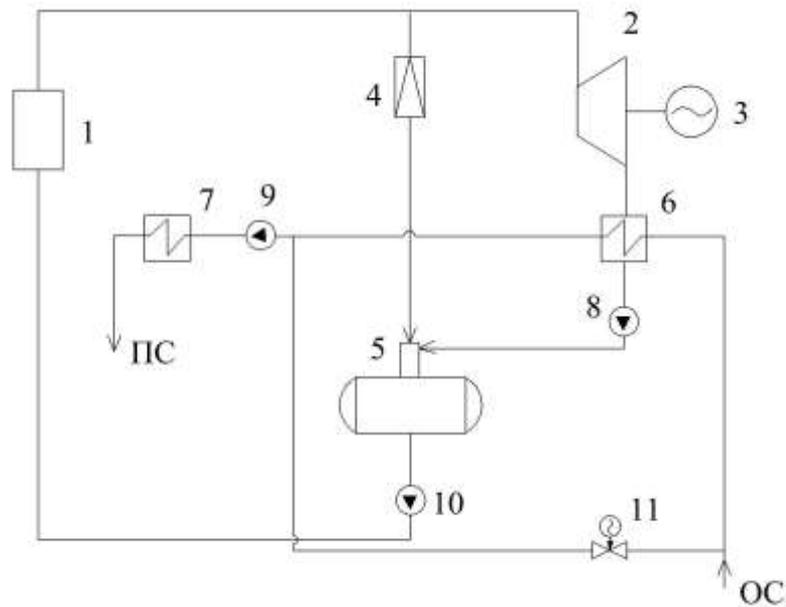


Рис. 6. Принципиальная тепловая схема подключения мини-ТЭЦ к паровой части котельной с атмосферными деаэраторами для закрытой системы теплоснабжения с размещением в машзале парового турбоагрегата, пароводяных подогревателей части потока сетевой воды и конденсатных насосов:

1 - паровой котел, 2 - паровая турбина, 3 - электрогенератор, 4 - редуционно-охлаждающая установка котельной, 5 - питательный атмосферный деаэратор, 6 - пароводяной подогреватель сетевой воды машзала, 7 - водогрейный котел, 8 - конденсатный насос машзала, 9 - сетевой насос котельной, 10 - питательный насос, 11 - регулятор расхода сетевой воды, ПС, ОС - подающая и обратная линии тепловой сети.

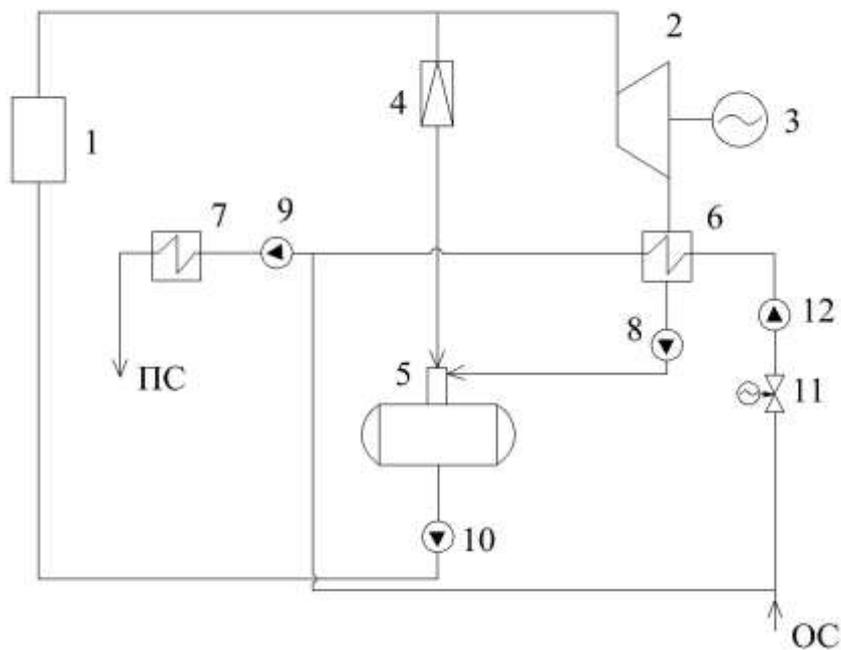


Рис. 7. Принципиальная тепловая схема подключения мини-ТЭЦ к паровой части котельной с атмосферными деаэраторами для закрытой системы теплоснабжения с размещением в машзале парового турбоагрегата, пароводяных подогревателей сетевой воды, подкачивающих насосов сетевой воды и конденсатных насосов:

1 - паровой котел, 2 - паровая турбина, 3 - электрогенератор, 4 - редуционно-охлаждающая установка котельной, 5 - питательный атмосферный деаэратор, 6 - пароводяной подогреватель сетевой воды машзала, 7 - водогрейный котел, 8 - конденсатный насос машзала, 9 - сетевой насос котельной, 10 - питательный насос, 11 - регулятор расхода сетевой воды, 12 - подкачивающие сетевые насосы машзала, ПС, ОС - подающая и обратная линии тепловой сети.

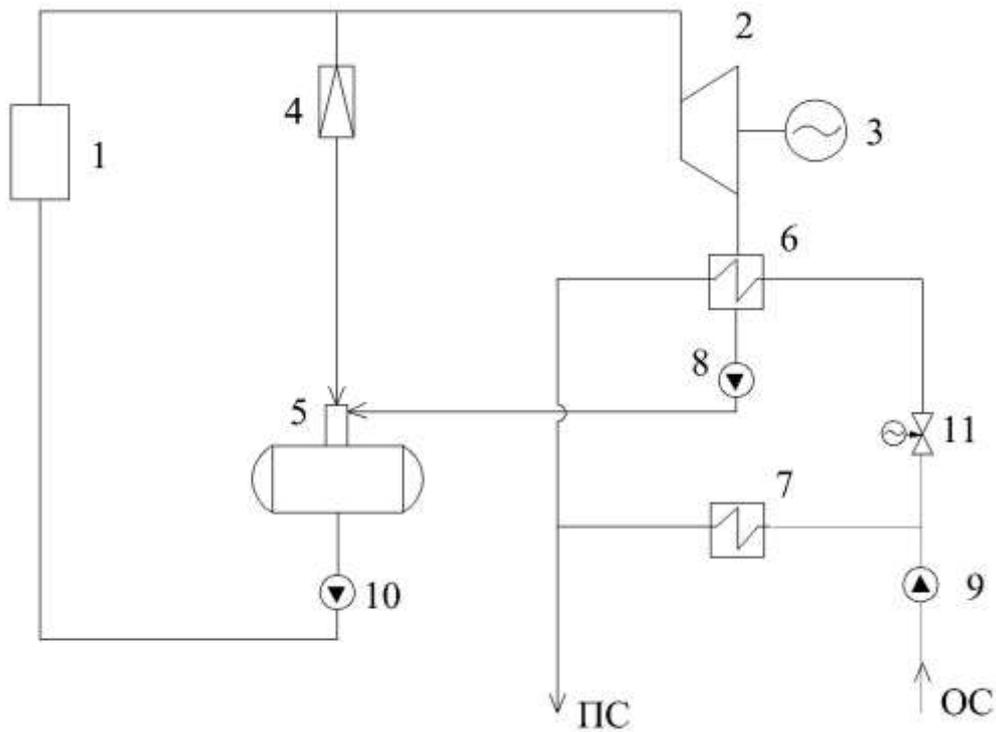


Рис. 8. Принципиальная тепловая схема подключения мини-ТЭЦ к паровой части котельной с атмосферными деаэраторами для закрытой системы теплоснабжения с размещением в машзале парового турбоагрегата, пароводяных подогревателей сетевой воды с параллельным присоединением к водогрейным котлам и конденсатных насосов:

1 - паровой котел, 2 - паровая турбина, 3 - электрогенератор, 4 - редукционно-охладительная установка котельной, 5 - питательный атмосферный деаэратор, 6 - пароводяной подогреватель сетевой воды машзала, 7 - водогрейный котел, 8 - конденсатный насос машзала, 9 - сетевой насос котельной, 10 - питательный насос, 11 - регулятор расхода сетевой воды, ПС, ОС - подающая и обратная линии тепловой сети.

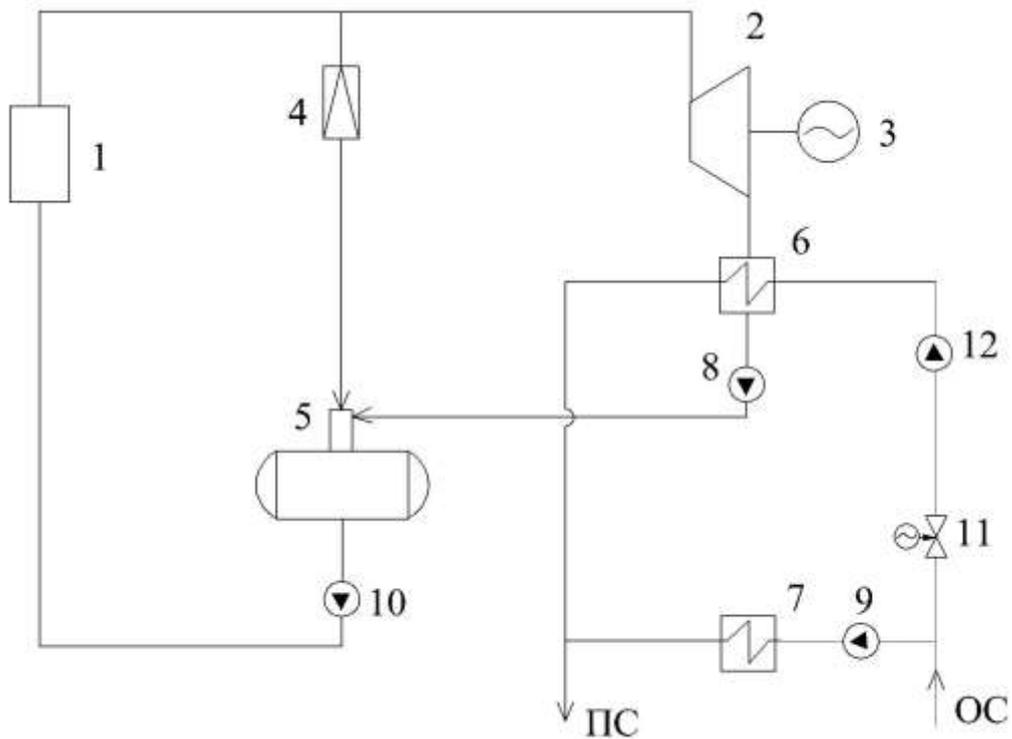


Рис.9

В схеме на рис. 9, примененной на мини-ТЭЦ ОАО "Агростройконструкция" (г. Вологда, проектировщик ЗАО "ВНИПИЭнергопром"), при параллельном подключении теплообменников машзала к водогрейным котлам применяются сетевые насосы машзала.

Разнообразие реализованных в проектной практике схемных решений позволяет осуществить наиболее удачный выбор тепловой схемы, соответствующей конкретным условиям работы котельной, и обеспечить эффективную, маневренную работу мини-ТЭЦ.

Опубликована в научно-техническом журнале "Новости теплоснабжения" №8, 2004 г., с.22-26.