ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩЕГО КОМПЛЕКСА МУНИЦИПАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

В.Т. Матвеев¹, А.В. Дологлонян¹, В.А. Очеретяный²

¹ Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

E-mail: dologlonyan@gmail.com

² Севастопольский государственный университет, РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

E-mail: ocheret-1961@rambler.ru

Для распределенной энергетики или локальных (технологически обособленных) объектов энергопотребления применение когенерационных технологий является одним из самых результативных путей повышения эффективности при создании муниципальных электротеплогенерирующих комплексов. Предлагаются принципы построения энергетики городского хозяйства, которая предусматривает наличие собственных мощностей генерации электрической и тепловой энергии при комбинированном их производстве, а также более эффективные когенерационные газотурбинные установки с турбокомпрессорной утилизацией. Способность при комбинированном производстве энергии приспосабливаться к потребным объемам энергии позволяет применение гибких когенерационных технологий, которые реализуются за счет изменения рабочих процессов в турбокомпрессорных утилизаторах газотурбинных установок, а также сочетания тепловых установок с энергоустановками, использующими альтернативные источники энергии.

Ключевые слова: региональная энергетика, энергоснабжение, глубокая утилизация теплоты, когенерационный газотурбинный двигатель (ГТД), турбокомпрессорный утилизатор.

Поступила в редакцию: 02.10.2018.

Введение. В мировой практике при переходе к системе умеренной централизации производства энергии, т.е. приближения генерирующих установок к потребителям энергии, находят широкое применение комплексы комбинированного производства энергии [1].

Например, г. Севастополь включает в себя рассредоточенные микрорайоны многоэтажных домов и районы малоэтажной застройки, нарезанные балками и бухтами. Распределены по районам и промышленные объекты, портовые сооружения.

Для комплексного обеспечения отдельных районов электроэнергией и теплотой (в том числе горячей водой) рационально применять распределенную энергетику комбинированного типа.

Учитывая сезонное и суточное потребление электроэнергии и особенно тепловой энергии, электротеплогенерирующий комплекс должен включать в себя:

- базовые объекты электроснабжения;
- базово-пиковые электротеплогенерирующие мощности;
- собственные установки электрогенерации на промышленных объектах,

объектах жизнеобеспечения и особого назначения.

Отдельно подлежит рассмотрению обеспечение энергией объектов городского хозяйства.

Общая характерная черта основных отраслей городских хозяйств – это большие удельные затраты энергии в предоставляемых услугах коммунальными предприятиями. Это касается: отопления и горячего водоснабжения; водоснабжения и канализации; электротранспорта; электроосвещения; обеспечения энергией объектов здравоохранения, образования, учреждений дошкольных, спорта и культуры.

Положение усугубляется постоянным ростом цен и тарифов на энергоресурсы на фоне низкой эффективности и старения энергооборудования и систем.

В целом, задача состоит в повышении энергоэффективности предприятий городского хозяйства и, как следствие, в решении социальной проблемы – достижении экономически обоснованных и соответствующих жизненному уровню жителей города тарифов за энергоемкие услуги и улучшения качества их предоставления.

Повышение энергоэффективности объектов городского хозяйства зависит от трех составляющих: генерация, передача и потребление энергии. Естественно, общий положительный эффект зависит от системной и, в целом, комплексной работы по всем трем составляющим.

Принципы повышения эффективности генерации энергии.

Первый (основной принцип) – комбинированное производство энергии на ТЭЦ, принадлежащих городу, которое позволяет эффективно использовать энергию топлива в процессе генерации за счет глубокой утилизации теплоты.

Эффект экономии топлива в когенерационной установке по сравнению с отдельным производством того же количества теплоты и электроэнергии достигается за счет замещения части топлива, сжигаемого в котле, энергией, утилизируемой из отработавших газов двигателя [2].

Основные требования, предъявляемые к когенерационной установке, должны быть следующие:

- степень использования энергии топлива в установке должны составлять не менее 75–85% в процессе генерирования энергии;
- доля вырабатываемой электрической энергии по отношению к суммарной должна быть выше для обеспечения меньшего срока окупаемости инвестиционных затрат;
- тепловая и конструктивная схемы когенерационной установки должны быть более приспособлены к переменному количеству энергии, поставляемой разным потребителям;

– вредная экологическая нагрузка на окружающую среду должна быть меньше, чем при отдельном производстве энергии.

При приближении энергогенерирующей установки к потребителю степень использования энергии топлива в ней можно получить не менее 75–85%, которая принципиально достигается за счет комбинированного производства электрической и тепловой энергии в ГТД простого цикла с утилизацией теплоты выхлопных газов в паровых или водяных утилизационных котлах. Такую тепловую схему можно считать базовой, в которой 75–85% полезно использованной энергии топлива в электрическую преобразуется 25–35%.

В дальнейшем одним из путей повышения энергоэффективности когенерационной ГТУ возможно за счет превращения части утилизируемой теплоты в механическую работу в турбокомпрессорном утилизаторе (ТКУ). Такой способ утилизации теплоты реализуется в газотурбинном двигателе с турбиной перерасширения [3]. В состав ТКУ входит турбина перерасширения (ТП), дожимающий компрессор (ДК) и охладитель газа между ними (рис. 1).

В предлагаемой схеме охладитель газа выполняет роль теплогенератора – водяного котла-утилизатора. В ТП используется внутренняя энергия выхлопных газов, что позволяет получить, за вычетом затрат энергии на дожимание газа, дополнительную полезную работу, увеличивающую эффективный КПД двигателя, оставляя теплотехнический (общий) КПД установки на уровне 80%.

Рис. 1. Схема когенерационного ГТД с турбокомпрессорным утилизатором: К – компрессор; КС – камера сгорания; Т – турбина; ТП – турбина перерасширения; ДК – дожимающий компрессор; ОГ – охладитель газа; ТТ – теплофикационный теплообменник; Н – нагрузка

Эффективный КПД ГТУ с ТКУ (П+ТП) при всех значениях степени повышения давления в компрессоре π_k в двигателе больше, чем в двигателе простого цикла (П), (рис. 2). В диапазоне оптимальных π_k относительный рост

КПД составляет 10–25%. Также увеличивается удельная мощность $n_{уд}$ в цикле. Для сравнения, на рис. 2 представлены характеристики ГТД с регенерацией теплоты (Р).

Рис. 2. Зависимость эффективного КПД η_e (сплошные линии) и удельной мощности $n_{уд}$ (прерывистые линии) от π_k при $T_3 = 1373$ К, $\pi_{dk} = 2,25$ и степени регенерации $\sigma = 0,85$

Второй принцип – это наличие в городском хозяйстве собственных мощностей генерации электрической и тепловой энергии, позволяющей поставлять энергию объектам городского хозяйства близкой к себестоимости с учетом минимальных затрат на передачу.

Задача решается за счет модернизации действующих ТЭЦ, реконструкции крупных котельных в ТЭЦ и строительство новых ТЭЦ средней мощности в районе крупных микрорайонов с предприятиями городского хозяйства, которые являются потребителями как электроэнергии, так и теплоты.

Для энергообеспечения коммунальных и промышленных объектов нужны когенерационные установки энергетической мощностью от 0,5 до 16 МВт и более. В этом диапазоне мощностей могут применяться двигатель-генераторы и газотурбогенераторы с утилизаторами теплоты. При электрической мощности от 0,5 до 5–6 МВт по технико-экономическим показателям предпочтительно использовать газодвигатели (ГД),

основным топливом которых является природный газ. В России ГД производятся заводом «Звезда» и заводом им. Климова, г. Санкт-Петербург, а также ОАО «Коломенский завод», причем электрическая мощность установок не превышает 1,5 МВт.

Промышленностью России – это ОАО «Рыбинские моторы»; ПАО «ОДК-Сатурн»; ОАО «Пермский моторный завод»; АО «ОДК-Авиадвигатель»; и ПАО «Кузнецов», вошедшие в состав АО «Объединенная двигателестроительная корпорация», НПО «Искра» и др. выпускаются энергетические установки когенерационного типа электрической мощностью 2,5 МВт и более на базе газотурбинных двигателей (ГТД), в которых совместно с теплоутилизационным контуром теплотехнический (общий) КПД достигает 80–85%.

Для примера, можно привести (табл. 1) характеристики пермских газотурбинных установок для оснащения ТЭЦ при их модернизации или новом строительстве.

Таблица 1. Характеристики энергетических ГТУ производства АО «Объединенная двигателестроительная корпорация» и НПО «Искра» (г. Пермь)

Параметр	Размерность	ГТЭС «Урал - 2500»	ГТЭС «Урал - 4000»	ГТЭС «Урал - 6000»	ГТЭС-12П	ГТЭС-16П	ГТЭС-18	ГТЭС-25П
1. Электрическая мощность	МВт	2,55	4,13	6,14	12,3	16,4	18,0	24,85
2. Тепловая мощность	Гкал/ч	5,82	8,3	11,59	16,6	20,2	-	26,97
3. КПД при выработке электроэнергии	%	21,12	24,0	26,13	32,6	34,8	35,7	37,8
4. Коэффициент использования топлива	%	76,9	80,2	83,4	83,7	84,6	-	85,5
5. Температура газов на выходе (после утилизации)	°С	110						

Более эффективны в энергетическом и экономическом плане когенерационные ГТУ с турбокомпрессорной утилизацией (ТКУ), которые являются одним из направлений совершенствования комбинированного производства энергии.

В ГТУ с ТКУ эффективный КПД приближается к величинам, достигнутым в

парогазовых установках (ПГУ) при сохранении достоинств когенерационных установок – высокого общего КПД. Такие результаты можно получить в ГТУ с ТКУ на базе выпускаемых в России ГТД (табл. 2).

Таким образом, ГТУ с ТКУ по эффективному и общему КПД могут конкурировать с ГД.

Таблица 2. Сравнительные данные технических характеристик ГТД простого цикла и ГТД с ТКУ

Наименование параметра	НК-38СТ* НК-38СТ+ТКУ ПАО «Кузнецов»	ГТД-10РМ* ГТД-10РМ+ТКУ ПАО «ОДК-Сатурн»	ГТД-16П* ГТД-16П+ТКУ АО «ОДК-Авиадвигатель»
Мощность на валу силовой турбины, кВт	$\frac{16000}{17970}$	$\frac{10230}{11645}$	$\frac{16400}{18660}$
Эффективный КПД ГТУ по ISO, %	$\frac{38,0}{42,7}$	$\frac{36,5}{41,5}$	$\frac{37,0}{41,6}$
Температура газа на выходе, °С	$\frac{456}{131}$	$\frac{512}{131}$	$\frac{470}{131}$
Степень повышения давления в дожимающем компрессоре	$\frac{-}{2,2}$	$\frac{-}{2,2}$	$\frac{-}{2,2}$
Расход воздуха через двигатель, кг/с	$\frac{57,9}{57,9}$	$\frac{32,5}{32,5}$	$\frac{56,2}{56,2}$
Мощность тепловая, кВт	$\frac{-}{16910}$	$\frac{-}{11544}$	$\frac{-}{15759}$
КПД теплотехнический, %	$\frac{-}{82,8}$	$\frac{-}{82,7}$	$\frac{-}{83,1}$
* в числителе – ГТД простого цикла, в знаменателе – ГТД с ТКУ			

Третий принцип – устойчивость системы теплоснабжения. Обеспечивается за счет наличия собственных источников электрообеспечения на крупных котельных.

В блочных электростанциях для котельных применяются газопоршневые двигатели с утилизатором теплоты. Так, например, блочно-контейнерную электростанцию мощностью 500 кВт поставляет завод «Звезда», г. Санкт-Петербург, а электрической мощностью 1500 кВт ОАО «Коломенский завод», причем тепловая мощность установки составляет 1000 кВт.

Также модульные электростанции поставляет завод им. Климова, г. Санкт-Петербург. На базе ГТД ТВЗ-117 электрическая мощность электростанции составляет 1,25 МВт, а тепловая – 2,27 Гкал/час.

Газотурбогенераторами можно надстраивать котлы. То есть вбрасывать горячие (400–500°C) выхлопные газы ГТД в топку котла, тем самым экономить расход топливного газа, одновременно вырабатывая электроэнергию для собственного потребления.

Предприятия «Теплокоммунэнерго» могут стать производителями электроэнергии, объемы производства которой в состоянии обеспечить поставку электроэнергии на другие предприятия городского хозяйства. В этом случае предприятие приобретает статус ТЭЦ, хотя основной задачей его является выработка тепловой энергии для коммунальных

объектов. Передача энергии производится в «розницу» через городские электросети.

Четвертый принцип – применение гибких когенерационных технологий.

Для когенерационных ГТД, обеспечивающих энергией автономные коммунальные и промышленные объекты, характерна работа на частичных нагрузках, причем обычно при изменении электрической нагрузки тепловая мощность часто должна быть более стабильной [4, 5].

Конструктивно когенерационный ГТД с ТКУ может быть выполнен со свободным ТКУ (СТКУ), изображенным на рис. 1.

Исследование характеристик когенерационных ГТД с СТКУ на переменном режиме производилось, и сравнивались с характеристиками ГТД простого цикла. При всех значениях относительной мощности $\bar{N}_e$ эффективный КПД схем ГТД с СТКУ выше (рис. 3), чем ГТД простого цикла (линия 2СН).

Результаты расчетов теплотехнических характеристик ГТД с СТКУ и простого цикла на частичных нагрузках представлены на рис. 4. При рассмотрении теплотехнических характеристик установлена высокая энергетическая эффективность ГТД с СТКУ, теплотехнический (общий) КПД ($\eta_{\text{гт}}$) которого с уменьшением мощности ГТД не только сохраняется на высоком уровне, но и несколько увеличивается [6, 7].

Рис. 3. Характеристики цикла ГТД с СТКУ на частичных нагрузках при $T_3 = 1473 \text{ K}$, $\pi_k = 22$ и $\pi_{\text{дк}} = 2,25$

Рис. 4. Теплотехнические характеристики ГТД с СТКУ на частичных нагрузках при $T_3=1473$ К, $\pi_k=22$ и $\pi_{dk}=2,25$

Гибкие когенерационные технологии, то есть управление потоками энергии, можно осуществить за счет изменения рабочего процесса в ГТД.

В схеме ГТД с СТКУ возможно управление теплотехническими характеристиками за счет изменения рабочего процесса на частичных нагрузках в СТКУ посредством регулируемого соплового аппарата (РСА) турбины перерасширения [8, 9].

Исследования теплотехнических характеристик ГТД с СТКУ на частичных нагрузках с РСА в ТП показали следующее: при уменьшении степени расширения в ТП (π_{tp}) уменьшается степень повышения давления в ДК (π_{dk}) и, как следствие (см. рис. 4), увеличивается тепловая мощность ТКУ (параметр $c=4$); при увеличении π_{tp} (параметр $c=-2$) можно по требованию потребителя уменьшить тепловую мощность энергоустановки, при этом эффективный КПД (η_e) растет, а теплотехнический КПД (η_{tr}) остается стабильно высоким.

Следовательно, за счет изменения характеристик СТКУ можно более гибко приспосабливаться к требованиям потребителей по видам и объемам поставляемой энергии.

Пятый принцип – применение интегрированных энергосистем. Сочетание традиционных тепловых установок с энергоустановками, использующими

альтернативные источники энергии. Имеются в виду солнечные тепловые коллекторы, тепловые насосы и даже термальные источники, наличие которых предполагается в районе Севастополя. Из них солнечные электростанции термодинамического типа наиболее эффективны, т.к. могут работать в когенерационном режиме.

Реализовать возможности комбинированного производства энергии (полигенерация) позволяет централизованная система теплоснабжения, сбалансированная по объемам поставляемой тепловой и электрической энергии при минимальных потерях в сетях. При этом необходима оптимизация действующих тепловых и электросиловых сетей с целью более эффективного использования действующих энергетических объектов, модернизации и наращивания мощностей под новое строительство на энергоэффективных и энергосберегающих технологиях.

Закключение. 1. Наличие собственных генерирующих мощностей электрической и тепловой энергии в городском хозяйстве обеспечивает экономическую и экологическую эффективность функционирования коммунальных предприятий.

2. Муниципальная энергетика должна строиться в основном на комбинированном и интегрированном принципах производства энергии.

3. Гибкие когенерационные технологии обеспечивают энергоэффективность энергетики городского хозяйства при сезонном режиме потребления видов энергии.

4. Методы и способы изменения рабочих процессов в газотурбинных установках с турбокомпрессорным утилизатором обеспечивают реализацию гибких когенерационных технологий.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и города Севастополь в рамках научного проекта № 18-48-920005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эффективные технологии производства электрической и тепловой энергии с использованием органического топлива / В.Т. Матвеев, О.Н. Фаворский, А.И. Леонтьев [и др.] М.: Изд. МЭИ. 2001. 16 с.

2. Матвеев В.Т., Очеретяный В.А., Горобец Г.В. Энергетические и приводные газотурбинные двигатели с блокированной силовой турбиной // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Харьков, 2013. Вып. 3/12 (63). С. 57–60.

3. Матвеев В.Т., Очеретяный В.А., Андриец А.Г. Перспективы повышения эффективности высокотемпературного газотурбинного двигателя усложнением цикла Брайтона // Вестник СевГТУ: сб. науч. тр. 2009. Вып. 97. С. 113–115.

4. Матвеев В.Т. Теплотехнические характеристики когенерационных га-

зотурбогенераторов с регенерацией теплоты при переменном режиме работы // Авиационно-космическая техника и технология. Харьков: НАУ «ХАИ», 2001. Вып. 23. С. 95–98.

5. Матвеев В.Т., Очеретяный В.А. Газотурбинные двигатели сложных циклов для морских нефтегазовых сооружений // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2017. № 9. С. 17–21.

6. Matviienko V., Ocheretyanyi V. Variable regimes operation of cogenerative gas-turbine engine with overexpansion turbine // Proceedings of ASME Turbo EXPO 2010, June 14-18, 2010, Glasgow, UK, GT2010-22029.

7. Матвеев В.Т. Теплотехнические характеристики когенерационных газотурбогенераторов с регенерацией теплоты при переменном режиме работы // Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. Харьков: НАУ «ХАИ», 2001. Вып. 23. С. 95–98.

8. Матвеев В.Т., Очеретяный В.А. Гибкие когенерационные технологии в газотурбинной установке сложного цикла с турбиной перерасширения // Промышленная теплотехника. Киев. 2007. Т. 29. № 7. С. 97–101.

9. Матвеев В.Т. Управление теплотехническими характеристиками ГТД со свободным турбокомпрессорным утилизатором // Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. Харьков: НАУ «ХАИ», 2009. Вып. 7/64. С. 35–38.

THE PRINCIPLES OF CREATION OF THE ELECTROHEATGENERATING COMPLEX OF MUNICIPAL POWER

V.T. Matviienko¹, A.V. Dologlonyan¹, V.A. Ocheretyanyi²

¹ Institute of Natural and Technical Systems, Russian Federation, Sevastopol, Lenin St., 28

² Sevastopol State University, Russian Federation, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

For the distributed power or the local (technology isolated) objects of energy consumption use of cogeneration technologies is one of the most productive ways of increase in efficiency during creation of the municipal electroheatgenerating complexes. The principles of creation of power of municipal economy, which provides availability of own capacities of generation of electrical and heat energy by the combined their production and more effective cogeneration gas turbine installations with turbocompressor utilization are offered. Ability at the combined energy production allows to adapt to required volumes of energy use of flexible cogeneration technologies which are implemented due to change of working processes in turbocompressor utilizers of gas turbine installations, and also a combination of thermal installations to the power stations using alternative energy sources.

Keywords: regional power, power supply, deep utilization of warmth, cogeneration gas turbine engine (GTE), turbocompressor utilizer.