

УДК 621.182

**Б.Д. БИЛЕКА, Л.К. ГАРКУША, В.Я. КАБКОВ***Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев***АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОДВОДА И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СБРОСНОЙ ТЕПЛОТЫ  
В КОТЛАХ КОГЕНЕРАЦИОННЫХ УСТАНОВОК С ГАЗОТУРБИНЫМИ  
И ГАЗОПОРШНЕВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ**

Рассмотрены вопросы формирования тепловой схемы когенерационной установки, регулирования тепловой мощности и их связь со способом и схемой использования сбросной теплоты двигателя. Рассмотрены вопросы агрегатной компоновки когенерационных установок с включением в технологическую схему теплофикационных котлов.

**выхлопные газы, газотурбинная установка, газопоршневый двигатель, газоздушная смесь, коэффициент использования теплоты топлива, котел-утилизатор, котел, когенерационная установка**

Главными вопросами, определяющими схемный и конструктивный облик когенерационной установки, являются выбор типа двигателя, его мощности и рабочих параметров; эти вопросы рассмотрены в [1], выбор схемы подвода и использования сбросной теплоты двигателя когенерационной установки, прежде всего выхлопных газов, согласование мощностных и расходных характеристик двигателей и котлов с заданными исходными данными по тепловым и электрическим нагрузкам установки.

Обеспечение максимальной экономической эффективности и минимизации срока окупаемости когенерационной установки реализуется при условии круглогодичной работы ее при полной электрической и тепловой нагрузке. Такой режим работы установки возможен при условии равенства тепловой мощности горячего водоснабжения тепловой мощности двигателя. Тепловая мощность когенерационной установки больше электрической в случае с ГПД примерно в 1,2 раза, а в случае с ГТУ примерно в 1,8...2,5 раза. Эти условия и определяют выбор двигателя установки, после чего согласовываются электрическая мощность его с потребностью энергетического объекта и с возможностью передачи электроэнергии во внешнюю сеть.

Следующий, пожалуй, наименее изученный принципиальный вопрос – формирование тепловой схемы установки, связан со способом и схемой ис-

пользования сбросной теплоты двигателя. Возможные варианты тепловых схем когенерационных установок с ГПД, и ГТУ представлены на рис. 1 и 2.

Наиболее распространенное, простое, схемное и конструктивное решение имеют когенерационные установки с котлом-утилизатором, чаще всего поставляемым производителем двигателя (рис. 1, а и 2, а). В такой схеме тепловую мощность котла-утилизатора, как было сказано выше, следует выбирать по тепловой нагрузке ГВС. К недостаткам этой схемы следует отнести достаточно жесткую взаимосвязь электрической и тепловой мощности и невозможность изменения их соотношения, что существенно ухудшает возможности регулирования и изменения необходимой тепловой нагрузки, а также отсутствие механизма улучшения экологических характеристик когенерационной установки по выбросам  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}$ . Принципиально возможно выбрать тепловую мощность двигателя по суммарной тепловой нагрузке ГВС и теплоснабжения (ТС), но экономическая целесообразность такого решения не будет высокой, поскольку в неотопливаемый период двигатель будет работать с существенной недогрузкой.

В случае, когда доля тепловой составляющей двигателя в суммарной мощности когенерационной установки мала, целесообразна схема с активным котлом со сбросом всех выхлопных газов ГПД непосредственно в зону горения (рис. 1, б).

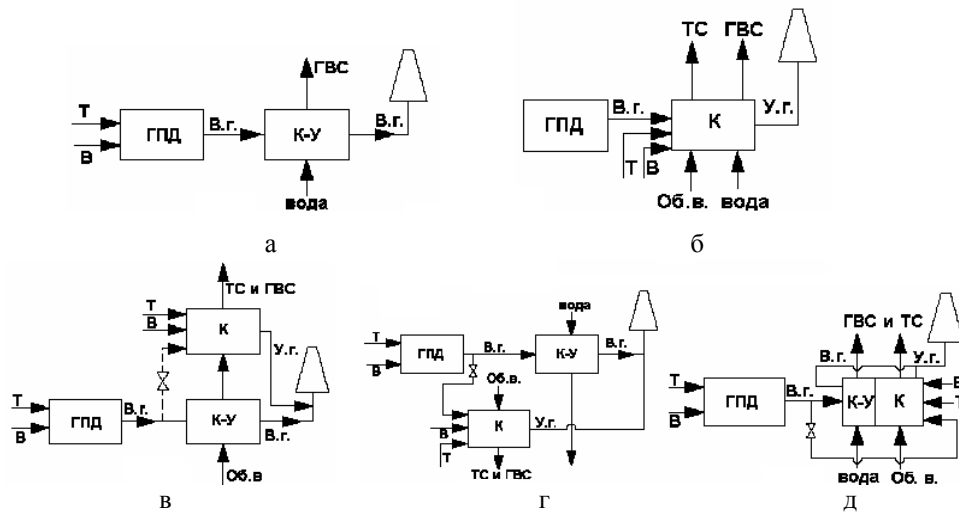


Рис. 1. Принципиальные тепловые схемы когенерационных установок с газопоршневыми двигателями: а – с котлом-утилизатором; б – с котлом и рециркуляцией выхлопных газов в котле; в – с последовательной работой котла-утилизатора и котла; г – с параллельной работой котла-утилизатора и котла; д – с совмещённым котлом-утилизатором и котлом с “подтопом”; Т – топливо; В – воздух; ГПД – газопоршневый двигатель; В.г. – выхлопные газы; ГВС – горячее водоснабжение; К-У – котёл-утилизатор; К – котёл; ТС – теплоснабжение; У.г. – уходящие газы; Об.в. – оборотная вода

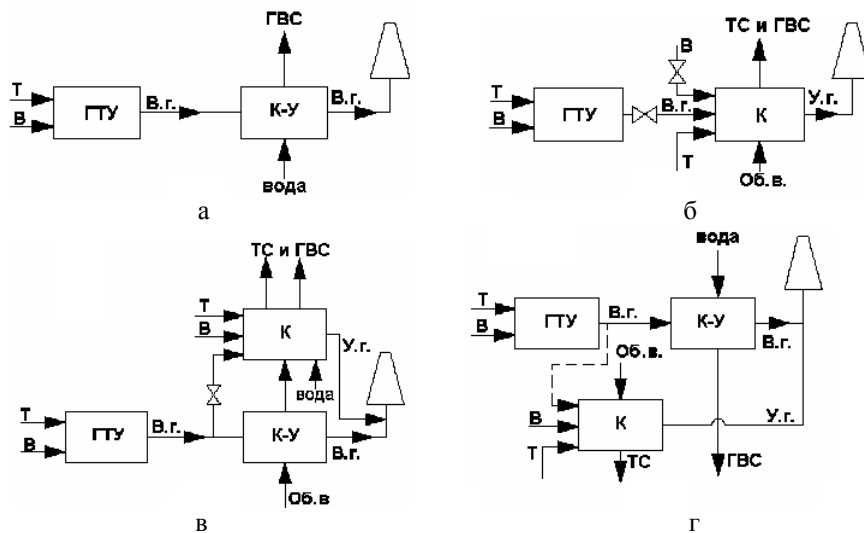


Рис. 2. Принципиальные тепловые схемы когенерационных установок с газотурбинными установками: а – с котлом-утилизатором; б – с котлом с “дожигом” и возможностью работы котла в автономном режиме, а также режиме котла утилизатора; в – с последовательной работой котла-утилизатора и котла; г – с параллельно работающим котлом-утилизатором и котлом. В – воздух; Т – топливо; ГТУ – газотурбинная установка; В.г. – выхлопные газы; ГВС – горячее водоснабжение; К-У – котёл-утилизатор; Об.в. – оборотная вода; К – котёл; У.г. – уходящие газы; ТС – теплоснабжение

В этом случае выхлопные газы будут выполнять функции рециркулирующих газов в котле. При этом долевая величина расхода выхлопных газов не должна превышать 0,15...0,3 расхода газозвдушной смеси на котел, что обеспечит не только наибольшую эффективность использования сбросной теплоты двигателя, но и существенное снижение выбросов NO<sub>x</sub> не менее 25...30 %. В неотапливаем-

ый период в случае близости тепловых мощностей двигателя и ГВС активный котел может быть переведен в режим работы пассивного котла, выполняя функции котла-утилизатора. В тех случаях, когда тепловые мощности ГПД и активного котла, а также расходы выхлопных газов и газозвдушной смеси на котел соизмеримы, экономически более целесообразны схемы с котлом-утилизатором и активным

котлом, обеспечивающими тепловые нагрузки по ГВС и теплоснабжению (рис. 1, в, г, д). Такие установки имеют хорошие регулировочные характеристики, поскольку позволяют изменять соотношения электрических и тепловых мощностей в достаточно широком диапазоне. При этом активный котел может функционировать в зависимости от потребностей не только в отопительный период. Такие схемы могут выполняться как с параллельно, так и с последовательно работающими котлом-утилизатором и активным котлом (рис. 1, в, г). В первом случае схема интегрирована по целевому теплоносителю, во втором она разделена по теплоснабжению и горячему водоснабжению. Для улучшения экологических характеристик в этих схемах следует предусматривать линии сброса части выхлопных газов из ГПД в активный котел для организации рециркуляции в них, исходя из названных выше соотношений расходов выхлопных газов и газовой смеси.

Схема с последовательно работающими котлом-утилизатором и активным котлом целесообразна при больших расходах целевого теплоносителя и близких по величинам тепловых потоков теплоснабжения и горячего водоснабжения с получением последнего по бойлерной схеме и при этом тепловая мощность двигателя меньше мощности потребляемой на ГВС. В этом случае котел-утилизатор выполняет функции теплообменника предварительно подогрева основного теплоносителя. Схема с параллельно работающими котлом-утилизатором и активным котлом целесообразна для случая, когда тепловые потоки теплоснабжения заметно превышают тепловые потоки на производство горячего водоснабжения. В неотопляемый период в зависимости от потребностей первая схема может работать как с котлом-утилизатором и котлом, так и без котла, вторая схема работает только с котлом-утилизатором.

К параллельной относится и схема с совмещенными котлом-утилизатором и активным котлом с так называемым “подтопом” и рециркуляцией выхлопных газов в котел. Эта схема по сути имеет те же тепловые характеристики, позволяющие увели-

чить диапазон регулируемых тепловых нагрузок и улучшить качество регулирования, что и параллельная, однако у неё лучшие массогабаритные и конструктивные показатели. Такие схемы реализованы и в Украине, правда, без рециркуляции.

Особенностями работы КГУ с газотурбинными установками, как известно, является большая единичная мощность ГТУ в сравнении с ГПД; большие величины расходов выхлопных газов, более высокий уровень кислородосодержания в них, определяемые более высоким уровнем коэффициентов избытка воздуха в ГТУ. И хотя тепловые схемы когенерационных установок с ГТУ принципиально подобны схемам с ГПД, более высокое кислородосодержание выхлопных газов (14...15 %) позволяет использовать их в активных котлах в качестве окислителя, а также для обеспечения рециркуляции, что оказывает влияние на схемы и характеристики установок. Поэтому, несмотря на большую конструктивную простоту, меньшее время строительства, монтажа и пуска установки с котлом-утилизатором, особенно в блочно-модульной поставке (рис. 2, а), более целесообразной и рациональной представляется схема установки со сбросом выхлопных газов ГТУ в активный котел (рис. 2, б). В ней предусматривается возможность работы котла как в автономном режиме на воздухе и топливе, так и на смеси выхлопных газов и воздуха, а также работы только на выхлопных газах. Кроме того, такая схема при определенных условиях позволяет в неотопляемый период переводить режим работы котла для обеспечения ГВС из активного в пассивный, превращая его тем самым в котел-утилизатор. Эту схему принято называть схемой с “дожигом”, подразумевая в этом термине дожигание в котле содержащегося в горячих выхлопных газах кислорода. Следует также отметить, что в установках с “дожигом” снижаются затраты электроэнергии на привод вентиляторов, поскольку основную часть окислителя составляют выхлопные газы двигателя. Таким образом тепловые схемы с “дожигом” более характерны для когенерационных установок с ГТУ имеют большую экономичность и обладают лучшими экологическими характеристиками.

Разновидностью схем с “дожигом” для КГУ на базе ГТУ являются схемы с активными котлами и котлами-утилизаторами, работающими последовательно и параллельно (рис. 2, в, г). Для них характерны те же особенности, что характерны для КГУ с ГПД. Основным достоинством этих КГУ является расширение их диапазона теплопроизводительности, обеспечение более высокой экономичности работы установок на переменных режимах работы при различных соотношениях тепловых нагрузок по теплоснабжению и ГВС. Таким образом, рассмотренные способы изменения и повышения тепловой мощности – “подтоп” и “дожиг” следует признать важными элементами когенерационных технологий. Реализация “подтопа” может быть осуществлена в двух модификациях – путём установки вне модуля дополнительной камеры сгорания, уходящие газы из которой подмешиваются к выхлопным газам ГПД перед котлом-утилизатором или путем установки непосредственно в котле-утилизаторе горелок, в которые дополнительно подаются газ и воздух. Возможны два способа в организации подтопа. Первый, когда температура продуктов сгорания поддерживается постоянной, а расход продуктов сгорания возрастает с ростом тепловой нагрузки. При этом коэффициент избытка воздуха сохраняется постоянным (порядка 1,05 ... 1,1). Второй способ, когда расход продуктов сгорания в подтопочном устройстве практически не изменяется, а изменяется их температура за счет изменения коэффициента избытка воздуха при соответствующих изменениях расхода топлива. Недостатком первого способа является то, что при существенном возрастании тепловых нагрузок расход может вырасти настолько, что его не пропустит котел-утилизатор, и в этом случае он должен проектироваться на соответствующий повышенный расход.

Для сравнения этих двух способов были проведены соответствующие термодинамические расчеты. Сопоставление характеристик когенерационных установок в зависимости от степени “подтопа”, представляющего собой отношение разности тепловых мощностей установки и двигателя, отнесенной к тепловой мощности двигателя. В наших расчетах

он изменяется в диапазоне от 0 до 0,8. В качестве двигателя рассматривался ГПД фирмы “Дойц” мощностью 1942 кВт.

Как уже говорилось выше в подтопочном устройстве первого типа температура продуктов сгорания остается постоянной, а расход на выходе из подтопочного устройства возрастает с ростом тепловой нагрузки (рис. 3). В подтопочном устройстве второго типа изменяется температура при слабо меняющемся расходе (рис. 4). Возрастают температура и расход продуктов сгорания на входе в К-У и соответственно, возрастает тепловая нагрузка. При росте величины “подтопа” снижается электрический к.п.д. когенерационной установки и возрастает тепловой. В целом это приводит к незначительному возрастанию КИТГ (рис. 5). Таким образом, можно утверждать, что “подтоп” по рассмотренным двум способам с регулированием тепловой нагрузки как по расходу, так и по температуре не снижает термодинамической эффективности КГУ, несмотря на увеличение расхода газа и может быть рекомендован для применения в тепловых схемах КГУ преимущественно с газопоршневыми двигателями.

Как уже упоминалось выше, в тепловых схемах КГУ на базе ГТУ для повышения и изменения тепловых нагрузок практически во всех возможных вариантах схем с котлом-утилизатором, с активным котлом и с их комбинацией более целесообразно применение “дожига”. Расчетные исследования позволили получить термодинамические характеристики этой схемы в названных выше случаях, а также провести сравнение двух рассматриваемых способов “дожига” и “подтопа” на примере расчёта КГУ с ГТУ мощностью 6 МВт НПП ГК “Зоря-Машпроект”. При этом рассматривались две модификации “дожига” – “дожиг” с использованием только выхлопных газов и “дожиг” с подмешиванием атмосферного воздуха и доведения уровня кислорода содержания в газовойоздушной смеси до 17 %. Коэффициент подтопа изменялся в пределах от 0 до 0,8. Увеличение “подтопа” сопровождается ростом температуры и расхода продуктов сгорания, а также некоторым ростом КИТГ (рис. 6).

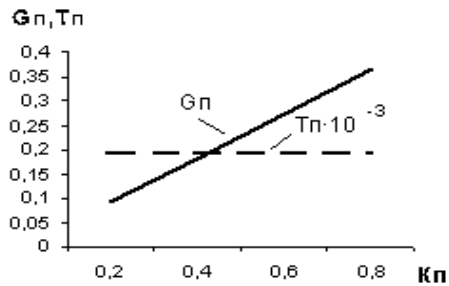


Рис. 3. Расход и температура продуктов подтопа

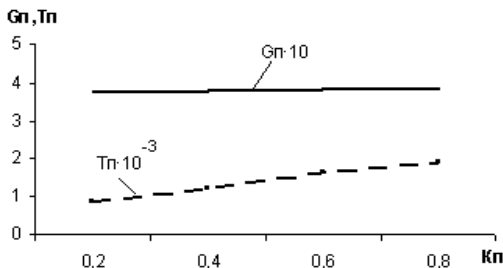


Рис. 4. Расход и температура подтопа

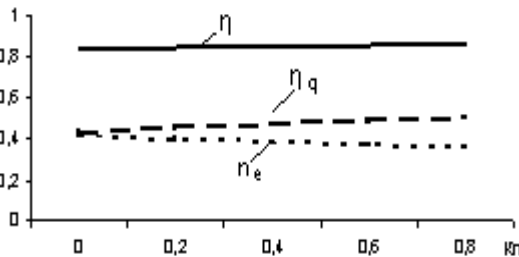


Рис. 5. Электрический, тепловой и общий КПД когенерационной установки

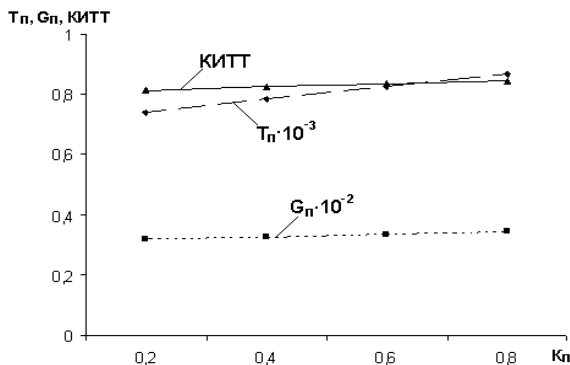


Рис. 6. Расход продуктов сгорания, температура и КИТТ при подтопе

При чистом дожиге (без подмешивания) расход продуктов сгорания перед котлом-утилизатором практически не меняется, а температура превышает температуру при “подтопе” (рис. 7), несколько возрастает и КИТТ. При максимальной тепловой мощности котла-утилизатора (18,2 МВт) экономия топлива по сравнению с подтопом составляет 4 %. а

расход продуктов сгорания на 10 % меньше. Для реализации такого процесса необходимы специальные высокотемпературные горелочные устройства.

Обогащение выхлопных газов воздухом с доведением кислородосодержания до 17 ... 17,5 % снижает температуру смеси и позволяет использовать обычные горелки, обеспечивая при этом устойчивое горение. Однако показатели этого способа температура смеси, расход и КИТТ перед котлом-утилизатором несколько ниже. Тем не менее, и в этом случае “дожиг” по сравнению с подтопом более выгоден.

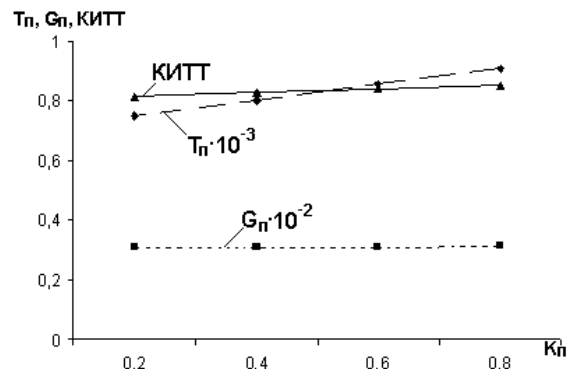


Рис. 7. Расход продуктов сгорания, температура и КИТТ при дожигании

## Выводы

Проведенные анализ и термодинамические расчеты существующих и возможных тепловых схем КГУ на базе ГПД и ГТУ создают основы методики выбора и построения базовых решений при создании когенерационных установок для коммунальной теплоэнергетики.

## Литература

1. Билека Б.Д., Гаркуша Л.К., Кабков В.Я. К выбору энергетического оборудования когенерационных установок малой и средней мощности // Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: Материалы 15-й конф. стран СНГ с междунар. участием. – К., 2005. – С. 57-64.

Поступила в редакцию 1.06.2007

**Рецензент:** чл.-корр. НАН Украины Н.М. Фиалко, Институт теплофизики НАН Украины, Киев.