

УДК 621.182

Б.Д. БИЛЕКА, В.Я. КАБКОВ, Е.В. СКЛЯРЕНКО, В.Н. ПОГОЖЕВ*Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, Украина***ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОГЕНЕРАЦИОННЫХ УСТАНОВОК С ПРИВОДОМ ОТ ГАЗОТУРБИННЫХ И ГАЗОПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

В статье изложены результаты исследований способов снижения выбросов оксидов азота и углерода, а также улучшения тепловых характеристик когенерационных установок (КГУ) с газотурбинными установками (ГТУ) и газопоршневыми двигателями (ГПД) с прямым сбросом выхлопных газов из двигателя в котел, а также из котла-утилизатора (К-У) в активный котел. Исследования проведены расчетным путем с использованием современных компьютерных программ. Для модульных КГУ с К-У, работающих автономно, исследования проводились на специальном экспериментальном стенде с дожигającym устройством, устанавливаемым между двигателем и К-У.

Ключевые слова: когенерационная установка, газопоршневой двигатель, газотурбинный двигатель, котел-утилизатор, окислы азота.

Введение

Влияние когенерационных технологий при комбинированной выработке электрической и тепловой энергии в котельных обеспечивает существенную экономию топлива и улучшение экологической обстановки по сравнению с их отдельной выработкой на ТЭС и в котельных. Возможны две схемы реализации когенерационных установок (КГУ) с газопоршневыми двигателями (ГПД) и газотурбинными установками (ГТУ). Первый – это установка в котельной ГПД или ГТУ со сбросом выхлопных газов из двигателей в котел непосредственно или через котел-утилизатор (К-У). Второй – это применение модульных КГУ, т.е. установок в составе двигатель-К-У, замещающих котел по выработке теплоты или работающих параллельно с ним.

Цель работы – исследовать возможные пути снижения выбросов оксидов азота и углерода из КГУ, работающих по первой и второй схеме, а также улучшения тепловых характеристик таких установок.

Основной материал

Одним из эффективных технологических методов, позволяющих существенно (в 5...7 раз) снизить выбросы оксидов азота из котлов, является рециркуляция дымовых газов котлов. В ряде случаев этот метод позволяет повысить и КПД котла. Однако исследований по влиянию сброса выхлопных газов из ГПД и ГТУ в котлы на характеристики работы и выбросов котлов проведено крайне мало. Между тем как способ создания окислителя топлива путем смешения дымовых газов котла и воздуха играет

существенную роль при снижении выбросов оксида азота. Именно способ создания окислителя и позволяет выполнить образование гомогенной смеси воздух-дымовые газы с определенным уровнем кислородосодержания и обеспечить отсутствие срыва факела и надежное снижение выбросов NO_x . Из трех известных способов рециркуляции в котлах наиболее подходящий для рассматриваемого случая является, так называемая, внешняя рециркуляция. Это подача отработавших дымовых газов на всасывающую магистраль вентилятора воздуха котла.

Для проведения исследований влияния сброса выхлопных газов ГПД и ГТУ в котел, работающих в составе когенерационной установки по первой схеме были использованы программа, разработанная ВТИ и МЭИ (ТУ) для определения выбросов NO_x из котлов [1], а также программа, разработанная в ИТТФ НАН Украины для термодинамических тепловых расчетов комплекса «Когенерационная установка ГПД (ГТУ) или установка ГПД (ГТУ) – активный котел». Расчеты проводились для двух вариантов КГУ первой схемы – как с ГПД, так и с ГТУ. При проведении расчетов рассматривались варианты с переменным кислородосодержанием (15...20%) и температурой смеси выхлопных газов (45...450 °С) и воздуха, подаваемых в котел, а также их степень рециркуляции 0,2...28%.

При сбросе выхлопных газов КГУ в тракт подачи воздуха в котел и подаче такого окислителя в горелочное устройство котла наблюдается снижение адиабатической температуры горения (рис. 1) на 365...390 градусов, повышается объем дымовых газов до 22% и, как результат, снижается эмиссия двуокиси азота в уходящих газах котла (рис. 2) для КГУ с ГПД и ГТУ и котлом в 2,7...2,8 раза, и для

КГУ с ГПД и ГТУ модульного типа и сбросом выхлопных газов в котел из К-У – в 2,7...3 раза (табл. 1). Экономия топлива в котле при этом, естественно, существенно зависит от температуры сбрасываемых в котел газов и соотношения расходов через котел и двигатель (табл. 1), и для КГУ по первой схеме с ГПД изменяется от 1 до 10%, а с ГТУ от 3,5 до 21%. Для КГУ модульного типа со сбросом из К-У экономия топлива в варианте КГУ с ГПД возрастает от 0,6 до 2,0%, с ГТУ – от 0,7 до 4,4%.

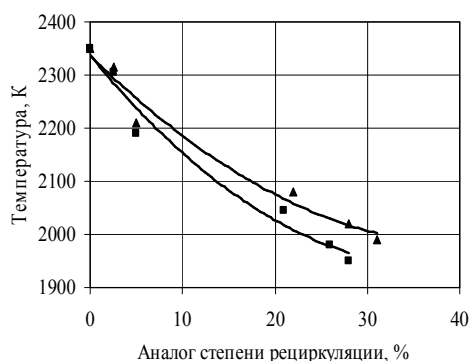


Рис. 1. Зависимость адиабатических температур горения от рециркуляции

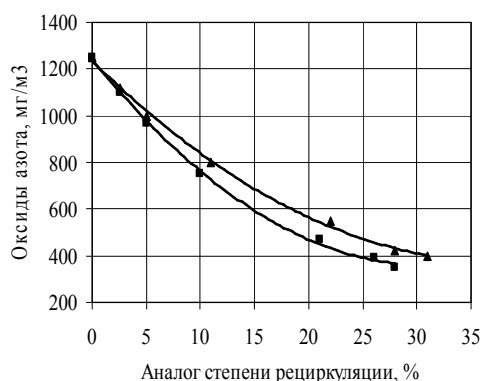


Рис.2. Зависимость содержания оксидов азота в дымовых газах активного котла от рециркуляции: ▲ – режим ГПД; ■ – режим КГПД

При разработке способов снижения вредных выбросов модульных КГУ с К-У следует учитывать, что пути внутрициклового нейтрализации оксидов азота и углерода, в выхлопных газах (ВГ) газопоршневых двигателей (ГПД), практически исчерпаны. Нормальным уровнем их концентрации признано считать 500...550 мг/м³. Поэтому, для нейтрализации вредных веществ часто идут по пути нейтрализации их после выхода ВГ из двигателя.

В этом плане известные способы нейтрализации ВГ ДВС можно разделить на: каталитические, термические, жидкостные, фильтры и комбинированные системы. Наибольшего распространения получили два первых способа и их комбинация. Однако, каталитический способ часто невозможно использовать в силу дороговизны применяемых катализаторов.

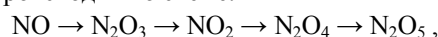
Таблица 1

Эмиссия и экономия топлива активного котла при использовании окислителем топлива его смеси отработанного газа ГПД или ГТУ и воздуха

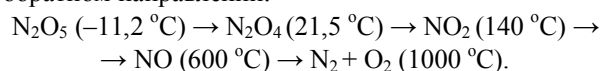
Газопоршневой двигатель (ГПД)			
Температура смеси, К	Кислородосодержание смеси, %	Экономия топлива котла, %	Эмиссия двуокиси азота, мг/м ³
339	20,38	1,32	1115
362,4	19,79	2,24	995
405,5	18,67	4,08	800
479	16,67	7,75	526
510,7	15,78	9,59	431
523,4	15,42	10,38	394
Газотурбинная установка			
377,9	19,89	3,47	1025
457	18,82	6,96	840
599,2	16,8	13,91	560
663,8	15,83	17,39	455
724,1	14,91	20,87	368
Когенерционный ГПД			
318,5	20,39	0,57	1084
322,3	19,81	0,73	962
329,4	18,73	1,06	748
341,3	16,89	1,72	472
346,4	16,09	2,05	382
348,4	15,77	2,19	349
Когенерационная ГТУ			
310,4	19,92	0,72	991
326,3	18,93	1,45	803
353,9	17,19	2,91	541
366,1	16,41	3,64	440
377	15,69	4,37	365

Для стационарных ГПД, агрегирующихся в составе КГУ с К-У, наиболее целесообразно применять термический способ, предусматривающий разложение оксидов азота до молекулярного азота, под действием высоких температур.

Как известно [2], что если при нормальной температуре и наличии кислорода, окисление окиси азота происходит по схеме:



при повышении температуры эта реакция идет в обратном направлении:



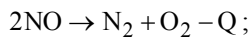
Основными факторами влияющими на него, являются температура, время реакции и наличие свободного кислорода в зоне реакции.

В условиях ДВС, на время реакции, практически повлиять нет возможности, поскольку оно определяется, в основном, частотой вращения коленчатого вала двигателя. Остается только два пути – снижение температуры процесса горения топлива и уменьшение концентрации свободного кислорода в зоне реакции.

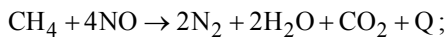
Наличие свободного кислорода связано как с общим избытком окислителя в цилиндре двигателя, так и с кислородом выделяющимся в реакции $2\text{NO} = \text{N}_2 + \text{O}_2$. Для связывания этого кислорода применяется технология термического обезвреживания окислов азота в присутствии газового, жидкого или твердого восстановителя.

Для условий стационарного ГПД наиболее экономически обоснованным можно считать процесс термического обезвреживания окислов азота, в присутствии газового восстановителя (природного газа, водорода, окиси углерода или аммиака). При этом процесс разложения окислов азота сопровождается прохождением следующих реакций:

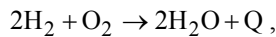
1-я стадия, независимо от типа восстановителя:



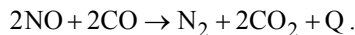
2-я стадия, при использовании природного газа:



при использовании водорода:



при использовании CO:



Согласно данным [2], процесс термического разложения окислов азота в присутствии газа – восстановителя начинается при температуре 700 °С и интенсифицируется с увеличением скорости разложения по мере увеличения температуры до 1000...1200 °С. Причем, скорость разложения сильно зависит от газа восстановителя. Так в присутствии CO она повышается до 77%, природного газа – 87%, водорода – до 90%, аммиака – 93%. Природный газ, хотя и менее эффективен в сравнении с другими восстановителями, но являясь наиболее доступным сырьем, может быть рекомендован для нейтрализации оксидов азота в ВГ ДВС, особенно в двигателях использующих природный газ в качестве топлива.

В Институте технической теплофизики НАН Украины была предложена схема нейтрализации ВГ стационарных ГПД при комбинированной выработке тепла и электроэнергии. В основе этой технологии лежит метод термической нейтрализации вредных компонентов ВГ двигателя (CO, CH, NO_x) в среде продуктов неполного сгорания природного газа (включающих CH₄, CO и H₂).

Для отработки технологических параметров процесса была создана экспериментальная установка. Установка позволяла моделировать продукты сгорания ДВС при рассматриваемых величинах коэффициентов избытка окислителя с заданной концентрацией оксида азота, регулировать и измерять материальные

потоки, температуру процесса, а также проводить анализ газовых сред в фиксированных точках установки. Опыты проводились в интервале температур 550...1000 °С. Влияние температуры на процесс нейтрализации окислов азота и CO обобщен на рис. 3.

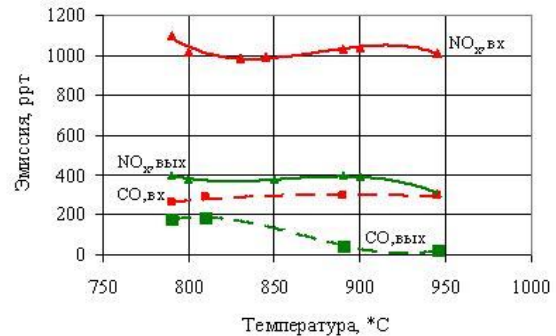


Рис. 3. Влияние температуры на термическое уничтожение NO_x и CO.

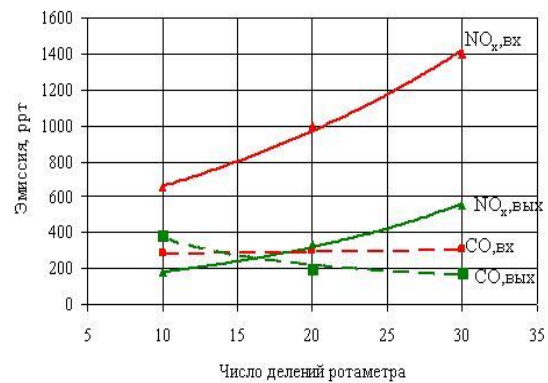
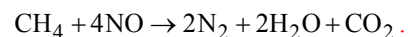
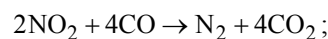
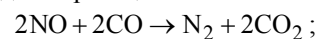


Рис. 4. Термическое (820 °С) разложение NO_x и CO при различной концентрации NO в исходных продуктах сгорания

Как видно, в диапазоне температур 750...1000 °С происходит снижение концентрации окислов азота в 2,5 – 3 раза, а окиси углерода почти в 5 раз. Эта тенденция сохранялась и при увеличении концентрации окислов азота в исходных продуктах сгорания (рис. 4).

Как показали опыты, степень нейтрализации составила более чем 60%, что можно отнести на счет прохождения реакций:



На это указывает увеличение более чем в 2 раза процентного содержания двуоксида углерода (CO₂) в продуктах сгорания.

Выводы

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Сброс выхлопных газов из ГПД и ГТУ непосредственно или через К-У в котел, который можно рассматривать как аналог рециркуляции дымовых газов в котельных установках, со степенью рециркуляции в пределах от 10 до 20%, обеспечивает снижение выбросов NO_x в 2,7...3 раза. Экономия топлива на котлах с непосредственным сбросом ВГ из двигателя в котел составляет от 10 до 20%, а в варианте со сбросом из К-У от 2 до 4% в зависимости от температуры ВГ и соотношения расходов топливно-воздушной смеси через котел и ВГ из двигателя. Проведенные исследования показывают достаточно высокую эффективность рассмотренных способов улучшения экологических и тепловых характеристик КГУ.

2. Предлагаемый термический метод позволяет уменьшать концентрацию окислов азота и СО в отработавших газах ДВС в 2,5-3 раза. Однако такое снижение возможно при определенном увеличении расхода газа на установку. Для модульных КГУ, работающих по второй схеме, это сопровождается увеличением тепловой мощности установки и улуч-

шением ее маневренности за счет обеспечения определенной независимости изменения тепловых нагрузок от электрических.

3. Для уменьшения расходов природного газа на термическое обезвреживание окислов азота и СО целесообразно продолжить исследования в направлении использования твердых восстановителей (кокс, древесной уголь). Это позволит не только обезвредить (до 100%) окислы азота и СО, но и задействовать местные виды топлива (биомассу) для повышения тепловой энергии в котлах-утилизаторах.

Литература

1. *Методические указания по расчету выбросов оксидов азота с дымовыми газами котлов тепловых электростанций* / В.Р. Котлер и др. – М.: ОАО «ВТИ», ГОУВПО МЭИ(ТУ), 2003. – 360 с.

2. *Кузнецов И.Е. Защита воздушного бассейна от загрязнения вредными веществами химических предприятий* / И.Е. Кузнецов, Т.М. Троицкая. – М.: Химия, 1979. – 344 с.

Поступила в редакцию 01.06.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. отделом высокотемпературной термогазодинамики, чл.-корр. НАН Украины А.А. Халатов, Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, Украина.

ШЛЯХИ ПОКРАЩЕННЯ ТЕПЛОВИХ І ЕКОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОГЕНЕРАЦІЙНИХ УСТАНОВОК З ПРИВОДОМ ВІД ГАЗОТУРБІННИХ І ГАЗОПОРШНЕВИХ ДВИГУНІВ

Б.Д. Білека, В.Я. Кабков, Є.В. Складенко, В.М. Погожев

В статті викладені результати досліджень способів зниження викидів оксидів азоту і вуглецю, а також покращення теплових характеристик когенераційних установок (КГУ) з газотурбінними установками (ГТУ) і газопоршневими двигунами (ГПД) з прямим скиданням вихлопних газів з двигуна в котел, а також з котлаутилізатора (К-У) в активний котел. Дослідження проведені розрахунковим шляхом з використанням сучасних комп'ютерних програм. Для модульних КГУ з К-У, що працюють автономно, дослідження проводилися на спеціальному експериментальному стенді з допалюючим пристроєм, встановленим між двигуном і К-У.

Ключові слова: когенераційна установка, газопоршневий двигун, газотурбінний двигун, котлаутилізатор, окисли азоту.

THE WAYS OF IMPROVEMENT OF HEAT AND ECOLOGICAL CHARACTERISTICS OF COGENERATION UNITS WITH GAS-TURBINE AND PISTON ENGINES

B.D. Bileka, V.J. Kabkov, E.V. Sklyarenko, V.N. Pogozhev

The results of investigations of ways for nitric oxide and carbon monoxide emission reduction, also improvement of heat characteristics of cogeneration units with gas-turbine and piston engines with direction of exhaust from engine to boiler and from boiler-utilizer to active boiler are presented. The investigations were made on the basis of modern computer programs. For module cogeneration units with boiler-utilizer investigations were carried out on special experimental stand with afterburner which was installed between engine and boiler-utilizer. Analysis of obtained results shows high efficiency of proposed ways for improvement of ecological and heat characteristics of cogeneration units.

Key words: cogeneration unit, piston engine, gas-turbine engine, boiler-utilizer, nitric oxide.

Білека Борис Дмитрієвич – д-р техн. наук, зав. лабораторією технологій комбінованої виробки енергії Інституту технічної теплофізики НАН України, Київ, Україна, e-mail: bilbo1@i.com.ua.

Кабков Віктор Яковлевич – научний співробітник відділа діагностики і оптимізації в енергетиці Інституту технічної теплофізики НАН України, Київ, Україна, e-mail: bilbo1@i.com.ua.

Складенко Євгеній Валентинівич – научний співробітник відділа діагностики і оптимізації в енергетиці Інституту технічної теплофізики НАН України, Київ, Україна, e-mail: bilbo1@i.com.ua.

Погожев Володимир Николаєвич – головний технолог відділа діагностики і оптимізації в енергетиці Інституту технічної теплофізики НАН України, Київ, Україна, e-mail: bilbo1@i.com.ua.