

Губарев Василий Яковлевич

Кандидат технических наук, профессор,
Липецкий государственный технический
университет

(Липецк, Россия)

E-mail: gv_lipetsk@rambler.ru

Gubarev Vasilij Yakovlevich

PhD in Technical Sciences,
Professor, Lipetsk State Technical
University

(Lipetsk, Russia)

E-mail: gv_lipetsk@rambler.ru

Арзамасцев Алексей Геннадиевич

Кандидат физико-математических наук,
доцент, Липецкий государственный
технический университет

(Липецк, Россия)

Arzamastsev Alexey Gennadyevich

PhD in Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor,

Lipetsk State Technical University

(Lipetsk, Russia)

Картель Александр Юрьевич

Ассистент, Липецкий государственный
технический университет

(Липецк, Россия)

E-mail: zetzervam@gmail.com

Kartel Alexander Yurievich

Assistant, Lipetsk State Technical
University

(Lipetsk, Russia)

E-mail: zetzervam@gmail.com

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ
ДЕТАНДЕР-ГЕНЕРАТОРНЫХ
АГРЕГАТОВ НА
КОГЕНЕРАЦИОННЫХ
КОТЕЛЬНОЙ С ДВИГАТЕЛЯМИ
ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

**RESEARCH INTO THE
APPLICATION OF EXPANDER-
GENERATOR SETS ON
COGENERATION BOILERS WITH
INTERNAL COMBUSTION
ENGINES**

Аннотация. В статье рассмотрены аспекты применения детандер-генераторных агрегатов (ДГА) на когенерационных котельных с двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Предложено принять в качестве критерия оценки энергетической эффективности использования ДГА величину суммарного приращения удельной полезной работы по выработке электроэнергии по сравнению со схемой с дросселированием газа. Показано, что при температурах наружного воздуха ниже оптимальной температуры топливной смеси энергетический эффект определяется только работой детандера, а при более высоких температурах необходимо учитывать изменения удельной работы ДВС и экономию удельных затрат электроэнергии на охлаждение смеси.

Abstract. The article deals with the aspects of the use of expander-generator aggregates (DHA) on cogeneration boilers with internal combustion engines (ICE). It is proposed to take as the criterion of estimating the energy efficiency of the use of DHA the value of the total increment of the specific useful work for the generation of electric power in comparison with the scheme with gas throttling. It is shown that at ambient temperatures below the optimal temperature of the fuel mixture, the energy effect is determined only by the operation of the expander, and at higher temperatures, it is necessary to take into account changes in the specific operation of the internal combustion engine and the saving of the specific electric energy consumption for cooling the mixture.

Ключевые слова: когенерационные котельные, детандер-генераторный агрегат, двигатель внутреннего сгорания, энергетический эффект

Keywords: cogeneration boiler houses, expander-generator set, internal combustion engine, energy effect

Введение

В настоящее время проблема внедрения ресурсосберегающих технологий в энергетике является особенно актуальной. Большинство строящихся котельных должно обладать возможностью когенерации, т.е. осуществлять выработку, как тепла, так и электроэнергии. В основном на таких котельных используются для выработки электроэнергии двигатели внутреннего сгорания (ДВС). Поступающий в котельную газ дросселируется перед топливосжигающими агрегатами, что не позволяет использовать потенциальную энергию его избыточного давления (6–12 атм) [1]. Одним из способов повышения энергоэффективности когенерационной котельной является применение детандер-генераторных агрегатов (ДГА), осуществляющих выработку электроэнергии за счет использования избыточного давления поступающего газа.

В работах [1]–[7], посвященных влиянию детандер-генераторного агрегата на повышение эффективности работы энергетических предприятий, рассмотрено применение схем с ДГА на ТЭЦ и отопительных котельных. При оценке энергетического эффекта от применения ДГА на когенерационных котельных необходимо учитывать влияние процесса расширения газа в детандере на величину коэффициента полезного действия ДВС. В настоящее время отсутствуют исследования, посвященные применению ДГА на когенерационных котельных, с учетом влияния параметров газа на выходе из детандера на эффективность работы двигателей внутреннего сгорания.

Основная часть

Оценка влияния ДГА на эффективность работы когенерационных котельных

При оценке применения ДГА на когенерационных котельных примем, что весь поступающий на котельную газ проходит через детандер, а затем разделяется на два потока: к двигателям внутреннего сгорания и к котлоагрегатам. Подогрев газа перед ДВС (необходим для поддержания минимально допустимой температуры смеси в холодный период) и котлоагрегатами (для поддержания максимально возможной температуры газа перед горелками котлов) осуществляется за счет уходящих газов ДВС. На рис. 1 изображена принципиальная схема применения ДГА на когенерационной котельной с газопоршневыми ДВС.

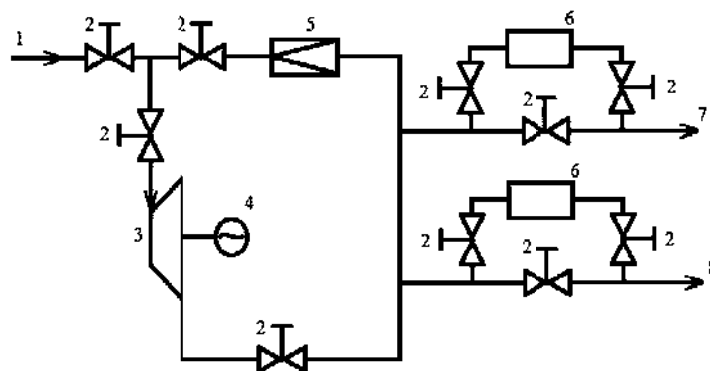


Рис. 1. Принципиальная схема использования ДГА:

1 – газопровод высокого давления; 2 – задвижки; 3 – детандер; 4 – электрогенератор;
5 – дросселирующее устройство; 6 – теплообменник; 7 – газопровод низкого давления к котлоагрегатам; 8 – газопровод низкого давления к ДВС

Удельная полезная работа ДГА:

$$l_{\text{дга}} = c'_p \cdot T_0 \cdot \left[1 - \left(\frac{P_{\text{вых}}}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \cdot \eta_{\text{д}} \cdot \eta_{\text{э.м.}},$$

где $P_0, P_{\text{вых}}$ – давления газа на входе в детандер и выходе из него соответственно, Па; T_0 – температура поступающего в котельную газа, К; k – показатель адиабаты; $\eta_{\text{д}}, \eta_{\text{э.м.}}$ – внутренний относительный и электромеханический к.п.д. детандера соответственно; c'_p – изобарная объемная теплоемкость газа, Дж/($\text{нм}^3 \cdot \text{К}$).

Удельная полезная работа ДВС находится по формуле:

$$l_{\text{двс}} = Q \cdot \eta_{\text{двс}}(t_{\text{см}}),$$

где Q – низшая теплота сгорания топлива, Дж/ нм^3 ; $\eta_{\text{двс}}$ – эффективный к.п.д. ДВС по выработке электроэнергии.

Температура топливной смеси находится из зависимости:

$$t_{\text{см}} = \frac{\rho_{\text{г}} \cdot c_{\text{г}} \cdot t_{\text{г}} + V_{\text{воз}} \cdot \rho_{\text{воз}} \cdot c_{\text{воз}} \cdot t_{\text{воз}}}{\rho_{\text{г}} \cdot c_{\text{г}} + V_{\text{воз}} \cdot \rho_{\text{воз}} \cdot c_{\text{воз}}},$$

где $\rho_{\text{г}}, \rho_{\text{воз}}$ – плотности газа и воздуха соответственно, $\text{кг}/\text{м}^3$; $c_{\text{г}}, c_{\text{воз}}$ – удельные массовые теплоемкости газа и воздуха соответственно, Дж/($\text{кг} \cdot \text{К}$); $t_{\text{г}}, t_{\text{воз}}$ – температуры газа и воздуха соответственно, $^{\circ}\text{C}$; $V_{\text{воз}}$ – объем воздуха при сжигании 1 нм^3 газа, $\text{нм}^3/\text{нм}^3$.

Особенностью работы газопоршневых ДВС является зависимость эффективного к.п.д. от температуры топливной смеси на входе в двигатель. Приблизительно постоянные значения эффективного к.п.д. сохраняются в диапазоне температур топливной смеси от минимально допустимой до оптимальной. С увеличением температуры смеси от оптимальной до максимально допустимой происходит снижение к.п.д. ДВС. При величине температуры топливной смеси выше максимально допустимого значения производитель ДВС обычно запрещает эксплуатацию двигателя. Для обеспечения работы двигателя в этом случае в схеме котельной предусматривается холодильная (обычно парокомпрессионная) машина для охлаждения поступающей в двигатель топливной смеси. При использовании парокомпрессионных холодильных машин необходимо учитывать уменьшение энергетического эффекта за счет затрат электроэнергии на охлаждение топлива.

Удельные затраты электроэнергии на охлаждение смеси, приведенные к 1 нм^3 газа, равны:

$$l_{\text{хол}} = \frac{1}{\varepsilon_{\text{x}}} \cdot (\rho_{\text{воз}} \cdot V_{\text{воз}} \cdot c_{\text{воз}} + \rho_{\text{г}} \cdot c_{\text{г}}) \cdot (t_{\text{см}} - t_{\text{см}}^{\text{max}}),$$

где ε_x – холодильный коэффициент; $t_{\text{см}}^{\text{max}}$ – максимально допустимая температура топливной смеси, °C.

Уменьшение температуры топливной смеси за счет применения детандера находится из зависимости:

$$\Delta t_{\text{см}} = \frac{l_{\text{дга}}}{c'_p \cdot \eta_{\text{э.м.}}} \cdot \frac{\rho_r \cdot c_r \cdot t_r}{\rho_r \cdot c_r + V_{\text{воз}} \cdot \rho_{\text{воз}} \cdot c_{\text{воз}}}.$$

Энергетический эффект от схемы с применением ДГА на когенерационной котельной заключается в экономии топлива по сравнению со схемой с дросселированием газа перед топливосжигающими агрегатами при неизменных величинах вырабатываемых когенерационной котельной электрической и тепловой мощности. Для обеспечения постоянной выработки теплоты расход и энтальпия газа перед котлоагрегатами принимаются неизменными для сравниваемых схем.

Экономия топлива за рассматриваемый период времени находится по формуле:

$$\Delta G_{\Sigma} = G_0 \cdot \frac{\Delta I_{\Sigma}}{l_{\text{дга}} + l_{\text{двс}} - l_{\text{хол}}} \quad (1)$$

где G_0 – общий расход топлива за данный период для схемы с дросселированием, нм^3 ; ΔI_{Σ} – приращение суммарной удельной полезной работы, Дж/нм^3 .

Приращение суммарной удельной полезной работы по выработке электроэнергии равно:

$$\Delta I_{\Sigma} = l_{\text{дга}} + g_0 \cdot (\Delta I_{\text{двс}} + \Delta I_{\text{хол}}),$$

где g_0 – доля используемого в ДВС топлива от общего расхода газа для схемы с дросселированием; $l_{\text{дга}}$ – удельная полезная работа детандера, Дж/нм^3 ; $\Delta I_{\text{двс}}$ – разница величин удельных полезных работ ДВС, Дж/нм^3 ; $\Delta I_{\text{хол}}$ – разница удельных затрат электроэнергии на охлаждение топливной смеси, Дж/нм^3 .

Из формулы (1) следует, что экономия топлива определяется в первую очередь величиной приращения суммарной удельной полезной работы по выработке электроэнергии. Выберем величину приращения суммарной удельной полезной работы в качестве критерия оценки энергоэффективности схемы с применением ДГА на когенерационной котельной.

Расчеты проводились по зависимостям для абсолютно сухого идеального газа, при этом природный газ рассматривался как чистый метан. Температура поступающего в котельную газа принималась равной температуре наружного воздуха. Расчеты проводились для величины входного абсолютного давления 7 бар, выходное давление принято равным 1,3 бар. Значения к.п.д. ДВС получены на основе анализа данных эксплуатации двигателя Caterpillar G3516 на мини-ТЭЦ ООО «Экомол» г. Липецк. Средние значения в промежутке температур топливной смеси от -30 °C (минимально допустимая температура) до +25 °C (оптимальная температура) составляют 39 %. При температурах смеси от +25 до +35 °C (максимально допустимая температура) происходит линейное уменьшение к.п.д. до 36 %. Величина внутреннего относительного к.п.д. детандера принята равной 75 %, электромеханического

к.п.д. – 95 %. Холодильный коэффициент парокомпрессионных холодильных машин принят равным 2.

На рис. 2 приведены графики зависимости приращения суммарной удельной полезной работы от температуры наружного воздуха.

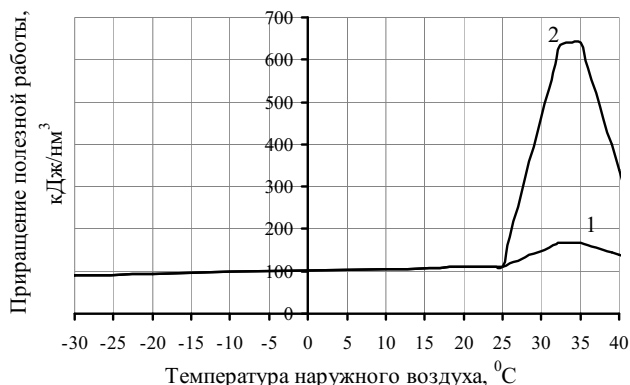


Рис. 2. Зависимость величины приращения суммарной удельной полезной работы от температуры наружного воздуха для схемы с ДГА при начальном давлении 7 атм и доли поступающего на ДВС топлива: 1 – $g = 0,1$; 2 – $g = 1$

Зависимость энергетического эффекта от температуры наружного воздуха можно разбить на 3 условные области, ограниченные значениями температур наружного воздуха. В первой области температура наружного воздуха меньше оптимальной температуры смеси. В этом случае ДВС работает с максимальным значением к.п.д., отсутствуют затраты электроэнергии на охлаждение топливной смеси. Энергетический эффект определяется только значением удельной полезной работы ДГА.

Температурный диапазон второй области находится в пределах от оптимальной до максимально допустимой температуры смеси. Энергетический эффект определяется работой детандера и изменением значений работы ДВС сравниваемых схем. В начале области с ростом температуры наружного воздуха энергетический эффект будет существенно возрастать за счет поддержания оптимального значения к.п.д. ДВС для схемы с детандером. После достижения оптимальной температуры смеси для схем с ДГА рост температуры наружного воздуха ведет к уменьшению удельной полезной работы ДВС, что снизит темп прироста энергетического эффекта.

В третьей области температура наружного воздуха больше максимально допустимой температуры смеси. Энергетический эффект в этой области определяется значениями удельной полезной работы ДГА, разницами удельных работ ДВС и затратами электроэнергии на охлаждение топливной смеси. Удельная полезная работа ДВС для варианта с дросселированием поддерживается постоянной при минимально допустимом к.п.д. за счет использования охлаждения смеси, в то время как для схем с ДГА рост температуры воздуха сопровождается уменьшением к.п.д. ДВС. В итоге снижается разница удельных полезных работ ДВС, что приводит к уменьшению энергетического эффекта, несмотря на экономию затрат электроэнергии на охлаждение топливной смеси для схемы с ДГА.

Увеличение доли поступающего в ДВС топлива при температурах воздуха выше оптимальной температуры смеси приводит к существенному повышению энергоэф-

фективности от применения ДГА за счет возрастания влияния разницы работ ДВС на суммарный энергетический эффект.

Выводы

Для когенерационных котельных с ДВС эффективность использования ДГА сильно зависит от температуры наружного воздуха. При температуре наружного воздуха ниже оптимального значения температуры смеси энергетический эффект определяется только удельной работой детандера. При температурах наружного воздуха выше оптимального значения температуры смеси большое влияние на величину энергетического эффекта оказывает поддержание температуры смеси в оптимальном диапазоне за счет охлаждения газа в детандере, что позволяет ДВС работать с максимальным значением к.п.д., а также и снизить затраты электроэнергии на охлаждение при температурах воздуха выше максимально допустимого значения температуры смеси.

Литература

1. Агабабов В.С., Корягин А.В. Определение энергетической эффективности использования детандер-генераторного агрегата в системах газоснабжения // Теплоэнергетика. 2002. №12. С. 35–38.
2. Агабабов В.С., Аракелян Э.К., Корягин А.В. Изменение удельного расхода топлива на электростанции конденсационного типа при включении в ее тепловую схему детандер-генераторного агрегата // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2000. № 3–4. С. 42–47.
3. Агабабов В.С. Влияние детандер-генераторного агрегата на показатели тепловой экономичности теплоэлектроцентрали // Вестник МЭИ. 2002. №5. С. 48–52.
4. Агабабов В.С., Корягин А.В., Титов В.Л., Михайлов И.А. О подогреве газа в детандер-генераторных агрегатах // Энергосбережение и водоподготовка. 2001. № 1. С. 38–42.
5. Агабабов В.С., Корягин А.В., Джураева Е.В. Влияние детандер-генераторного агрегата на показатели тепловой экономичности КЭС // Известия академии наук. Энергетика. 2002. №2. С. 54–59.
6. Агабабов В.С., Андреев А.Р. Изменение показателей котельных при применении детандер-генераторных агрегатов // Промышленная энергетика. 2004. №7. С. 38–44.
7. Андреев А.Р. Изменение показателей работы котельных при применении ДГА с подогревом газа дымовыми газами ГТУ // Промышленная энергетика. 2005. №1. С. 42–44.

References

1. Agababov V.S., Koryagin A.V. Opredeleniie energeticheskoi effektivnosti ispol'zovaniia detander-generatornogo agregata v sistemakh gazosnabzheniia [Determination of the energy efficiency of the use of an expander-generator set in gas supply systems]. *Teploenergetika* [Heat Power Engineering], 2002, no. 12, pp. 35–38.
2. Agababov V.S., Arakelian E.K., Koriagin A.V. Izmeneniye udel'nogo rashkoda topliva na elektrostantsii kondensatsionnogo tipa pri vkl'yuchenii v yeye teplovuiu skhemu detander-generatornogo agregata [A change in the specific fuel consumption at a condensing-type power plant when an expander-generator set is included in its thermal scheme]. *Izvestiia vuzov* [Izv. High schools. Problems of energy], 2000, no. 3–4, pp. 42–47.
3. Agababov V.S. Vliianiie detander-generatornogo agregata na pokazateli teplovoi ekonomichnosti teploelektrotsentrali [Influence of an expander-generator set on the thermal thermal efficiency of a combined heat and power plant]. *Vestnik MEI* [Bulletin MEI], 2002, no. 5, pp. 48–52.
4. Agababov V.S., Koriagin A.V., Titov V.L., Mikhailov I.A. O podogreve gaza v detander-generatornykh agregatakh [On gas heating in expander-generator sets]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka* [Energy saving and water treatment], 2001, no. 1, pp. 38–42.
5. Agababov V.S., Koriagin A.V., Juraeva E.V. Vliianiie detander-generatornogo agregata na pokazateli teplovoi ekonomichnosti KES [Influence of the expander-generator set on the thermal

efficiency of IES]. *Izvestiia Akademii Nauk. Energetika*. [Proceedings of the Academy of Sciences. Power Engineering], 2002, no. 2, pp. 54–59.

6. Agababov V.S., Andreev A.R. *Izmeneniie pokazatelei kotel'nykh pri primenenii detan-der-generatornykh agregatov* [Changing the parameters of boiler rooms when using detan-der generator units]. *Promyshlennaia energetika* [Industrial Power Engineering], 2004, no. 7, pp. 38–44.

7. Andreev A.R. *Izmeneniie pokazatelei raboty kotel'nykh pri primenenii DGA s podo-grevom gaza dymovymi gazami GTU* [Change in the performance of boiler rooms when using DHA with heating gas flue gas GTU]. *Promyshlennaia energetika* [Industrial Energy], 2005, no. 1, pp. 42–44.

Губарев В.Я., Арзамасцев А.Г., Картель А.Ю. Исследование особенностей применения детандер-генераторных агрегатов на когенерационных котельных с двигателями внутреннего сгорания // Вестник Череповецкого государственного университета. 2018. №1 (82). С. 20–26.

For citation: Gubarev V.Y., Arzamastsev A.G., Kartel A.Y. Research into the application of expander-generator sets on cogeneration boilers with internal combustion engines. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2018, no. 1 (82), pp. 20–26.