УДК 621.3
DOI: 10.53015/18159958_2025_21_1_31.

ОПТИМАЛЬНЫЙ РЕЖИМ ПОКРЫТИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА КОГЕНЕРАЦИОННОЙ КОТЕЛЬНОЙ С ДВИГАТЕЛЯМИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕТАНДЕР-ГЕНЕРАТОРНЫХ АГРЕГАТОВ С ПОДОГРЕВОМ ГАЗА

THE OPTIMAL MODE OF COVERING THE ELECTRICAL LOAD IN A COGENERATION BOILER HOUSE WITH INTERNAL COMBUSTION ENGINES AND THE USE OF EXPANDER-GENERATOR UNITS WITH HEATED GAS

©2025

Арзамасцев Алексей Геннадьевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики
Картель Александр Юрьевич[1], кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики
Шарапов Алексей Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики

Arzamassev Alexey Gennadievich, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Thermal Power Engineering
Kartel Alexander Yurievich[1]**,** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Heat Power Engineering
Sharapov Alexey Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Heat Power Engineering

Липецкий государственный технический университет, Липецк (Россия)
Lipetsk State Technical University, Lipetsk (Russia)

E-mail: arzamastcev-ag@mail.ru
E-mail: zetzervam@gmail.com [1]https://orcid.org/0000-0002-5435-0212
E-mail: sharapov-lipetsk@yandex.ru

Аннотация: В работе проведен анализ особенностей применения схемы с детандер-генераторными агрегатами и подогревом газа на когенерационных котельных с газопоршневыми двигателями внутреннего сгорания. Выявлено отсутствие методики определения оптимального режима работы данной схемы, с учетом влияния работы детандера и подогрева газа на работу основного оборудования. Для рассмотренной схемы с детандерами и предварительным подогревом газа предложен критерий оптимизации, и на основании данного критерия разработан режим оптимального функционирования данной схемы в любой момент времени. Для выбранной в качестве примера когенерационной котельной с двигателями внутреннего сгорания оценена максимальная экономия топлива от реализуемого режима управления подогревом в заданном диапазоне температур воздуха. Показано, что наибольший эффект от реализации предложенного режима будет достигаться при наименьших давлениях газа.

Ключевые слова: когенерационные котельные, детандер-генераторный агрегат, подогрев газа, оптимальный режим**.**

Для цитирования: Арзамасцев, А.Г. Оптимальный режим покрытия электрической нагрузки на когенерационной котельной с двигателями внутреннего сгорания и использованием детандер-генераторных агрегатов с подогревом газа / А.Г. Арзамасцев, А.Ю. Картель, А.И. Шарапов // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2025. – Т. 21, № 1 (77). – С. 31-37. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_1_31.

Abstract: The paper analyzes the application features of the scheme with expander-generating units and gas heating in cogeneration boilers with gas piston internal combustion engines. The absence of a methodology for determining the optimal mode of operation of this circuit has been revealed, taking into account the effect of the expander and gas heating on the operation of the main equipment. For the considered scheme with expanders and preheating of gas, an optimization criterion is proposed and, based on this criterion, a mode of optimal functioning of this scheme at any given time is developed. For the cogeneration boiler house with internal combustion engines chosen as an example, the maximum fuel economy from the implemented heating control mode in a given air temperature range is estimated. It is shown that the greatest effect from the implementation of the proposed regime will be achieved at the lowest gas pressures.

Keywords: cogeneration boilers, expander-generator unit, gas heating, optimal mode.

For citation: Arzamastsev, A.G. Optimal mode of covering the electrical load in a cogeneration boiler house with internal combustion engines and the use of expander-generator units with gas heating in the summer period / A.G. Arzamastsev, A.Yu. Kartel, A.I. Sharapov // Vesti higher Educational Institutions of the Chernozem region. – 2025. – Vol. 21, № 1 (77). – P. 31-37. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_1_31.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из трендов совершенствования современной энергетики является ресурсосбережение, целью которого является снижение затрат ресурсов на производство единицы энергии (как тепловой, так и электрической). Для этого осуществляется переход от вырабатывающих чисто тепловую энергию котельных к когенерационным котельным, которые осуществляют комбинированную выработку тепловой и электрической энергии. Для котельных относительно малой мощности (до 5 МВт) выработка электроэнергии осуществляется за счет полезной работы, полученной в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) при сжигании топлива, а тепловая нагрузка покрывается за счет тепла уходящих газов в специальных теплообменниках. Поступающий на предприятие газ (давление 6-12 атм) дросселируется до давления, чуть большего, чем атмосферное [1-5]. Если перед ДВС дроссель заменить на детандер-генераторный агрегат, в котором давление газа снижается за счет процесса расширения (близкого к адиабатному), то можно получить дополнительно полезную работу и использовать ее для производства электроэнергии.

Рассматривая влияние охлаждения только на работу ДГА, можно сказать, что охлаждение газа в ряде случаев негативно скажется на его функционировании (возможность перехода паров влаги в твердое состояние). Для предотвращения этого явления наиболее эффективно применить предварительный подогрев газа, также подогрев увеличивает работу детандера за счет возрастания входной температуры газа.

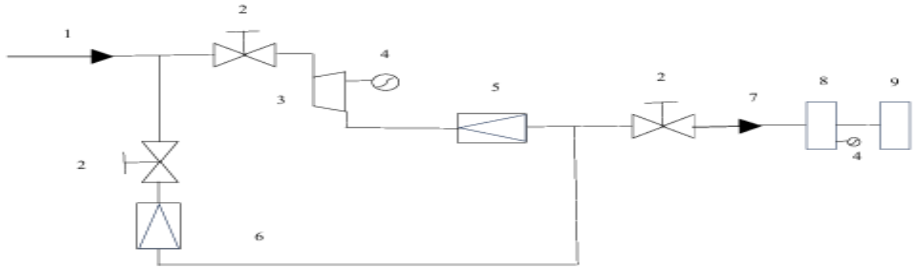
В работах авторов [6-15] проанализирована эффективность различных источников и схем с подогревом топлива. Уходящие газы являются наиболее эффективным источником тепла для подогрева топлива в силу большого их количества (при сжигании 1 м^3 метана образуется около10 м^3 уходящих газов), что приводит к незначительному снижению их температуры после подогревателя (на 10–15 ºС в зависимости от конечной температуры подогрева топлива) и позволяет в дальнейшем использовать тепло уходящих газов. Однако надо учитывать также влияние температуры газа на работу основ-

ного оборудования, которым являются ДВС. Увеличение температуры газа может уменьшить электрический КПД ДВС при высоких температурах воздуха, что объясняется особенностью зависимости КПД ДВС от температуры поступающей смеси, когда до определенной оптимальной температуры смеси $t_{опт}$ (около 25 ºС) КПД ДВС меняется незначительно, а после начинает резко снижаться. Таким образом, подогрев газа может в определенных случаях понизить эффективность работы основного оборудования (ДВС), хотя его применение всегда благоприятно влияет на работу вспомогательного оборудования (ДГА).

Целью статьи является разработка оптимального режима работы схемы с ДГА и подогревом газа на когенерационных котельных с ДВС.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Объектом анализа являются режимы работы схем с ДГА и подогревом газа на когенерационных котельных, использующих в качестве основного оборудования газопоршневые ДВС. Принцип действия таких котельных основан на преобразовании совершенной в ДВС полезной работы в электроэнергию в соединенных с ДВС электрогенераторах. Покрытие тепловой нагрузки происходит в специальных теплобменниках-утилизаторах рекуперативного типа за счет использования физического тепла уходящих газов ДВС. Дополнительно незначительная часть электрической нагрузки может быть покрыта с помощью ДГА. На рис. 1 представлена принципиальная схема данной когенерационной котельной.



Обозначения:

1–газопровод к котельной;	1–gas pipeline to the boiler room;
2–задвижки;	2–gate valves;
3–детандер;	3–expander;
4–электрогенератор;	4–electric generator;
5–дросселирующее устройство;	5–throttling device;
6–байпас;	6–bypass;
7–газопровод к ДВС;	7–gas pipeline to the internal combustion engine;
8–ДВС;	8–internal combustion engine;
9–теплообменники-утилизаторы.	9–heat exchangers-heat exchangers.

Рис. 1. Принципиальная схема ДГА с подогревателем перед детандером для когенерационной котельной

Fig. 1. Schematic diagram of a DGA with a heater in front of the expander for a cogeneration boiler house

Наиболее энергоэффективным режимом работы такой котельной будет такой режим, который обеспечивает минимальный расход топлива для покрытия тепловой и электрической нагрузки в любой момент времени.

Так как величины требуемой электрической мощности могут меняться в опреде-

ленных пределах в процессе работы, что влечет за собой изменение расхода топлива, то в качестве основного критерия оптимизации режима работы схемы с ДГА и подогревом в летний период принимаем величину суммарной удельной полезной работы по выработке электроэнергии ДГА и ДВС. Данный критерий обратно пропорционален расходу топлива при заданном значении выработанной электрической мощности и однозначно определяет эффективность использования топлива для выработки электроэнергии.

Расчет суммарной полезной работы проводится по представленной ниже методике.

Природный газ при расчетах можно принимать как метан, а расчеты вести по формулам для идеального газа.

Действительная удельная работа ДГА (Дж/м^3) будет определяться по формуле:

$$l_{\text{дга}} = c_p^{/} \cdot T_{\text{г.вх.}} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_{\text{г.вых.}}}{P_{\text{г.вх.}}}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right] \cdot \eta_{\text{д.}} \cdot \eta_{\text{э.м.}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{г.вх.}}$ – входная температура газа, К; $P_{\text{г.вх.}}, P_{\text{г.вых.}}$ – входное и выходное давления газа соответственно, Па; $c_p^{/}$ – изобарная объемная теплоемкость газа, Дж/(м^3·К); k – показатель адиабаты; $\eta_{\text{д}}$ – внутренний относительный КПД детандера; $\eta_{\text{э.м.}}$ – электромеханический КПД ДГА.

Температура газа после детандера при реальном процессе рассчитывается по зависимости:

$$T_{\text{вых.}} = T_{\text{вх.}} \cdot \left[1 - (1 - \left(\frac{P_{\text{г.вых.}}}{P_{\text{г.вх.}}}\right)^{\frac{k-1}{k}}) \cdot \eta_{\text{д.}}\right], \quad (2)$$

Температура газовоздушной смеси будет находиться по формуле:

$$t_{см.} = \frac{\rho_{\text{г.}} \cdot V_{\text{г.}} \cdot c_{\text{г.}} \cdot t_{\text{г.}} + \rho_{\text{воз.}} \cdot V_{\text{воз.}} \cdot c_{\text{воз.}} \cdot t_{\text{воз.}}}{\rho_{\text{г.}} \cdot V_{\text{г.}} \cdot c_{\text{г.}} + \rho_{\text{воз.}} \cdot V_{\text{воз.}} \cdot c_{\text{воз.}}}, \quad (3)$$

где $\rho_{\text{г.}}, \rho_{\text{воз.}}$ – плотности газа и воздуха при нормальных условиях соответственно, кг/м^3; $c_{\text{г.}}, c_{\text{воз.}}$ – удельные массовые изобарные теплоемкости газа и воздуха соответственно, Дж/(кг·К); $t_{\text{г.}}, t_{\text{воз.}}$ – температуры газа и воздуха соответственно, ºС; $V_{\text{г.}}, V_{\text{воз.}}$ – расходы газа и воздуха соответственно, м^3/с.

КПД ДВС равен оптимальному значению $\eta_{\text{опт}}$, для газовоздушной смеси, температура которой меньше оптимальной температуры смеси ($t_{\text{опт}}$) для данной марки двигателя.

КПД ДВС при температуре смеси выше оптимального значения, можно с высокой степенью точности вычислить по формуле:

$$\eta_{\text{двс}} = \eta_{\text{опт}} \cdot \left(1 - k_t \cdot (t_{\text{см.}} - t_{\text{опт.}})\right), \quad (4)$$

где k_t – коэффициент изменения КПД от температуры, (ºС)$^{-1}$.

Для каждого типа ДВС данный коэффициент определяется эмпирическим путем.

Удельная полезная работа ДВС (Дж/м^3), пошедшая для выработки электроэнергии, определяется как:

$$l_{\text{двс}} = Q_{\text{н}}^{\text{р}} \cdot \eta_{\text{двс}}, \quad (5)$$

где $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – теплота сгорания топлива, Дж/м^3; $\eta_{\text{двс}}$ – электрический КПД ДВС.

Для когенерационной котельной с ДВС суммарная удельная работа системы (Дж/м^3) находится из зависимости:

$$l_{\Sigma} = l_{\text{двс}} + l_{\text{дга}}, \quad (6)$$

Предварительный подогрев газа увеличивает работу ДГА, но при высоких температурах воздуха может снизить работу ДВС. Только комплексный подход с учетом работы основного и вспомогательного оборудования и взаимосвязи между ними позволит реализовать оптимальный режим работы котельной.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПОДДЕРЖАНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАССМАТРИВАЕМЫХ КОТЕЛЬНЫХ

На основании предложенного критерия разработаем методику, позволяющую в летний период добиться оптимального режима работы схемы с подогревом в любой момент времени. Оптимальный режим – это такой

режим, который обеспечивает максимальное значение суммарной полезной работы котельной при данных параметрах топлива и воздуха. Для котельных рассматриваемого типа максимальная полезная работа конвертируется в минимальный расход газа, необходимый для покрытия текущей электрической нагрузки, что обеспечивает максимально энергоэффективный режим работы рассматриваемой системы в любой момент времени.

Для реализации оптимального режима необходимо иметь автоматизированную систему управления подогревом, которая на основании заложенной в процессоре методики и поступающих данных о параметрах газа и воздуха будет управлять подогревом газа. Программное обеспечение настроено таким образом, чтобы программа по сравнению величин суммарных работ для вариантов с наличием и отсутствием подогрева начинала работу только при условии превышения температуры воздуха известной для данного типа ДВС оптимальной температуры смеси. Исходными данными (с возможностью корректировки в дальнейшем) являются теплофизические свойства газа и воздуха, зависимость по расчету КПД ДВС, значения КПД ДГА и оптимальной температуры смеси. Также программа непрерывно получает от измерительных приборов данные о текущих параметрах воздуха и газа.

Программа рассчитывает величины суммарной полезной работы котельной для вариантов с наличием подогрева и при выключенном подогреве по описанной выше методике на основе зависимостей (1)-(6), после чего эти величины сравниваются друг с другом. Если вариант с отсутствием подогрева обеспечивает большую суммарную работу, то автоматика подает сигнал на перекрытие поступления уходящих газов в подогреватель, реализуется режим с отключенным подогревом топлива. Если вариант с подогревом дает возможность получить большую суммарную работу, то автоматика обеспечивает поступление уходящих газов в подогреватель, что позволяет нагреть топливо до заданной температуры, величина которой поддерживается постоянной с помощью регулирования расхода поступающих в теплообменник уходящих газов.

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА

Для примера выберем когенерационную котельную с ДВС марки «Caterpillar» электрической мощностью 1 МВт. Газ в расчетах принимается как метан, его давление 7 атм. Коэффициент избытка воздуха 1,1. Температуру поступающего газа примем равной температуре воздуха. КПД ДГА равен 0,75, электромеханический КПД 0,97. КПД ДВС остается постоянным до 25 ºС и равен 38 %, после до температуры смеси 35 ºС он линейно снижается до 36 %. Температуру газа после подогревателя принимаем 100 ºС.

Из расчетов следует, что для рассмотренной схемы подогрев газа должен быть отключен при температурах воздуха от 27 ºС и выше. При температурах воздуха от 27 ºС до 35 ºС расход топлива от отключения подогрева снизится до 2,5 % (чем выше температура, тем больше экономия топлива). При температурах воздуха менее 27 ºС предварительный подогрев газа должен быть включен.

ВЫВОДЫ

Анализ предложенных зависимостей (1)-(6) показывает, что повышение начального давления газа увеличивает температуру отключения подогрева, так как больший перепад давления в детандере позволяет сильнее охладить топливную смесь, поэтому температура смеси сравнивается с оптимальным значением при более высоких температурах воздуха. Относительная экономия топлива при этом будет меньше, чем при более низком давлении. Таким образом, предложенная схема управления подогревом газа имеет максимальный эффект при относительно низких давлениях поступающего природного газа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье разработан режим оптимального функционирования схемы с ДГА и подогревом на когенерационных котельных с

ДВС. В качестве критерия оптимизации предложено использовать суммарную полезную работу котельной по выработке электроэнергии. Оптимальный режим должен обеспечить максимальное значение данного критерия в любой момент времени с учетом параметров газа и воздуха. Показано, что при достижении определенной температуры воздуха необходимо отключать подогрев, сформулировано условие определения данной температуры. Для рассмотренного примера показано, что отключение подогрева в период высоких температур наружного воздуха может снизить расход топлива до 2,5 %. Повышение давления поступающего газа снизит энергетический эффект от реализуемого режима за счет более сильного охлаждения газа в детандере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mehdi T.J., Hasan R., Hossein A.A. Modeling turbo-expander systems // Simulation. 89. 2013. Vol. 2. P. 234-248.

2. Quoilin S., Lemort V., Lebrun J. Experimental study and modeling of an Organic Rankine Cycle using scroll expander // Applied Energy. 2010. Vol. 87. P. 1260-1268.

3. Testing and modeling a scroll expander integrated into an Organic Rankine Cycle / V. Lemort, S. Quoilin., C. Cuevas, J. Lebrun // Applied Thermal Engineering. 2009. Vol. 29. P. 3094-3102.

4. Herron T., Petrerson R.B., Wang H. Performance of a small-scale regenerative Rankine power cycle employing a scroll expander // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. 2008. Vol. 222. P. 271–282.

5. Theoretical and experimental results of a mesoscale electric power generation system from pressurized gas flow / D. Krähenbühl, C. Zwyssig, H. Weser, J.W. Kolar // IOP Publishing, Journal of Micromechanics and Microengineering. 2009. Vol. 19. P.1-7.

6. Zamfirescu C., Dincer I. Performance Investigation of high-temperature heat pumps with Various BZT working fluids // Thermochimica Acta. 2009. Vol. 488. P. 66-67.

7. Cinella P., Hercus S. Robust optimization of dense gas flows under untertrain operating conditions // Computers und fluids. 2010. Vol. 39. P. 1893-1908.

8. Congedo P., Cinella P., Corre C. Shape optimization for dense gas flows in turbine cascades // Proceeding of ICCFD4. 2006. Vol. 1. P. 555-560.

9. Quantification of thermodynamic uncertrainties in real gas flows / L . Parussini, L. Pediroda, P. Congedo, P. Cinella // Int. J. Eng. Syst. Model Simul. 2010. Vol. 2, № 1-2. P. 12-24.

10. Truston A. Recovering energy in gas pressure reduction // Contr. and instrum. 1991. Vol. 5. P. 115-117.

11. Агабабов В.С. Бестопливные установки для производства электроэнергии, теплоты и холода // Главный энергетик. 2016. № 5. С. 33-37.

12. Стребков А.С., Жавроцкий С.И. Оценка эффективности производства электрической энергии при использовании силового потенциала топливного газа // Вестник Брянского государственного университета. 2013. № 4. С. 77-86.

13. Жигулина Е.В., Калинин Н.В., Хромченков В.Г. Эффективность подогрева природного газа при использовании детандер-генераторных агрегатов на тепловых электростанциях // Новости теплоснабжения. 2010. № 2. С. 34-38.

14. Корягин А.В., Соловьев Р.В. Установка детандер-генераторных агрегатов на ТЭЦ промышленных предприятий // Энергосбережение и водоподготовка. 2009. № 5. С. 34-35.

15. Оценка энергетической эффективности применения детандер-генераторных агрегатов в системах скомбинированным производством тепла и электроэнергии / А.Ю. Картель, В.Я. Губарев, А.Г. Арзамасцев, А.И. Шарапов // Проблемы региональной энергетики. 2018. № 3 (38). С. 93-101.

REFERENCES

1. Mehdi T.J., Hasan R., Hossein A.A. Modeling turbo-expander systems // Simulation. 89. 2013. Vol. 2. P. 234-248.

2. Quoilin S., Lemort V., Lebrun J. Experimental study and modeling of an Organic Ran-

kine Cycle using scroll expander // Applied Energy. 2010. Vol. 87. P. 1260-1268.

3. Testing and modeling a scroll expander integrated into an Organic Rankine Cycle / V. Lemort, S. Quoilin, C. Cuevas, J. Lebrun // Applied Thermal Engineering. 2009. Vol. 29. P. 3094-3102.

4. Herron T., Petrerson R.B., Wang H. Performance of a small-scale regenerative Rankine power cycle employing a scroll expander // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. 2008 Vol. 222. P. 271- 282.

5. Theoretical and experimental results of a mesoscale electric power generation system from pressurized gas flow / D. Krähenbühl, C. Zwyssig, H. Weser, J.W. Kolar // IOP Publishing, Journal of Micromechanics and Microengineering. 2009. Vol. 19. P. 1-7.

6. Zamfirescu C., Dincer I. Performance Investigation of high-temperature heat pumps with Various BZT working fluids // Thermochimica Acta. – 2009. Vol. 488 P. 66-67.

7. Cinella P., Hercus S. Robust optimization of dense gas flows under untertrain operating conditions // Computers und fluids. 2010. Vol. 39. P. 1893-1908.

8. Congedo P., Cinella P., Corre C. Shape optimization for dense gas flows in turbine cascades // Proceeding of ICCFD4. 2006. Vol. 1. P. 555-560.

9. Quantification of thermodynamic uncertrainties in real gas flows / L. Parussini, L. Pediroda, P. Congedo, P. Cinella // Int. J. Eng. Syst. Model Simul. 2010. Vol. 2, № 1-2. P. 12-24.

10. Truston A. Recovering energy in gas pressure reduction // Contr. and instrum. 1991. Vol. 5. P. 115-117.

11. Agababov V.S. Fuel-free installations for the production of electricity, heat and cold Chief Power Engineer. 2016. № 5. P. 33-37.

12. Strebkov A.S., Zhavrotsky S.V. Evaluation of the efficiency of electric energy production using the power potential of fuel gas // Bulletin of the Bryansk State University. 2013. № 4. P. 77-86.

13. Zhigulina E.V., Kalinin N.V., Khromchenkov V.G. Efficiency of natural gas heating when using expander-generator units at thermal power plants // Heat supply News. 2010. № 2. P. 34-38.

14. Koryagin A.V., Solovyov R.V. Installation of expander-generator units at thermal power plants of industrial enterprises // Energy saving and water treatment. 2009. № 5. P. 34-35.

15. Evaluation of the energy efficiency of the use of expander-generator units in combined heat and electricity production systems / A.Y. Kartel, V.Ya. Gubarev, A.G. Arzamastsev, A.I. Sharapov // Problems of regional energy. 2018. № 3 (38). P. 93-101.