

На правах рукописи



Картель Александр Юрьевич

**АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СХЕМ С
ДЕТАНДЕР-ГЕНЕРАТОРНЫМ АГРЕГАТОМ ДЛЯ
КОГЕНЕРАЦИОННЫХ КОТЕЛЬНЫХ С ДВИГАТЕЛЯМИ
ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

05.14.01 – Энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Липецкий государственный технический университет»

Научный руководитель: **Губарев Василий Яковлевич**

кандидат технических наук, профессор,
заведующий кафедрой Промышленная
теплоэнергетика ФГБОУ ВО «ЛГТУ»

Официальные

оппоненты:

Кругликов Петр Александрович

доктор технических наук, доцент, главный
научный сотрудник лаборатории 023 Научно-
производственного объединения по
исследованию и проектированию
энергетического оборудования им. И.И.
Ползунова

Корягин Анатолий Викторович

кандидат технических наук, старший научный
сотрудник, доцент кафедры
Тепломассообменные процессы и установки

Ведущая организация: Саратовский государственный технический
университет имени Гагарина Ю.А. г. Саратов

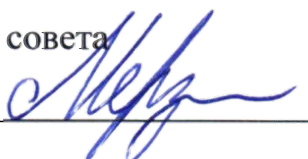
Защита диссертации состоится « 15 » октября 2020 г. в 16 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета МЭИ.014 при ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

Автореферат разослан _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

МЭИ.014 к.т.н., доцент



Мерзликina Е.И.

Актуальность проблемы. Природный газ занимает существенную долю в топливно-энергетическом балансе Российской Федерации. В настоящее время большинство строящихся и проектируемых котельных должны обладать возможностью когенерации, то есть осуществлять одновременную выработку тепла и электроэнергии. Большая часть таких котельных предусматривает применение для производства электроэнергии двигателей внутреннего сгорания. Одним из решений проблемы повышения энергоэффективности котельных с ДВС является использование дополнительных энергетических потенциалов природного газа и внутренних энергоресурсов котельной. Применение детандер-генераторных агрегатов позволяет использовать потенциальную энергию давления природного газа для выработки электроэнергии, а также при высоких температурах наружного воздуха поддерживать за счет охлаждения газа в детандере температуру поступающей в двигатель внутреннего сгорания топливной смеси в оптимальном диапазоне, что обеспечивает высокие значения эффективного КПД ДВС. Существующие в данной области исследования не содержат комплексной оценки энергетического эффекта от применения различных схем с ДГА в когенерационных котельных с ДВС, учитывающей влияние процессов в ДГА на эффективность работы ДВС. Это определяет актуальность темы работы.

Объектом исследования являются когенерационные котельные с газопоршневыми двигателями внутреннего сгорания при использовании на данных котельных детандер-генераторных агрегатов.

Цель работы. Улучшение технико-экономических показателей когенерационных котельных с двигателями внутреннего сгорания за счет использования ДГА, исследование энергетического эффекта от применения различных схем с ДГА, исследование влияния влажности газа на эффективность работы ДГА и анализ способов повышения эффективности работы детандера при применении влажного газа.

В диссертационной работе **требуется решить следующие задачи:**

1. Провести анализ исследований применения ДГА на энергетических предприятиях.
2. Предложить новые технические решения при использовании детандер-генераторных агрегатов в составе когенерационных котельных с двигателями внутреннего сгорания.
3. Разработать методику определения энергетической и технико-экономической эффективности когенерационных котельных с двигателями внутреннего сгорания при их совместной работе с ДГА.
4. Провести оценку влияния схемных решений и режимов работы ДГА на энергетическую эффективность газопоршневых ДВС при различных температурах воздуха.

5. Исследовать влияние влагосодержания газа на величину удельной полезной работы детандера, провести анализ эффективности мер по устранению ограничений, накладываемых на работу детандера содержанием в газе паров воды.

6. Оценить ожидаемые энергетический и экономический эффекты от реализации схемы с ДГА на действующей когенерационной котельной.

Научная новизна работы:

1. Разработана методика проведения термодинамического и технико-экономического анализов схем применения детандер-генераторных агрегатов (ДГА) в когенерационных котельных с двигателями внутреннего сгорания (ДВС), особенность которой состоит в использовании полученной автором функциональной зависимости изменения суммарной удельной полезной работы газопоршневых ДВС и ДГА от температуры наружного воздуха при расчете энергетического эффекта, определении оптимального годового режима работы для схемы с подогревом газа в ДГА, а также энергетического эффекта от реализации такого режима.

2. Разработана методика определения влияния начального влагосодержания природного газа на показатели работы ДГА при различных давлениях и температурах газа с учетом ограничений, накладываемых условием отсутствия образования кристаллогидратов после детандера, позволяющая определить эффективность мер, направленных на увеличение удельной полезной работы детандера для различных схем применения ДГА.

Соответствие паспорту специальности. Научная новизна работы соответствует пунктам 2 и 5 паспорта специальности 05.14.01 «Энергетические системы и комплексы».

Теоретическая значимость работы состоит в разработке методики расчета энергетической и технико-экономической эффективности котельных с двигателями внутреннего сгорания при их совместной работе с ДГА; выявлении и оценке влияния схемных решений и режимов работы ДГА на энергетическую эффективность газопоршневых ДВС при различных температурах воздуха; разработке методики оценки влияния величины влагосодержания природного газа на показатели работы детандера.

Практическая значимость работы.

1. Разработанные методики позволят научным и проектным организациям принимать обоснованные решения при выборе схемы применения ДГА для действующих и проектируемых когенерационных котельных с ДВС, а также определять ожидаемые энергетический и экономический эффекты, полученные в результате эксплуатации таких установок в различных режимах.

2. Предложенная автором схема (патент №162579) с применением адсорбционной осушки влажного газа перед детандером используется при проведении предпроектных

исследований при разработке проекта когенерационной котельной с ДГА для птицефабрики «Липецкая».

Методология исследования. В работе используются теоретические методы исследования, основанные на применении апробированных зависимостей по определению основных показателей работы рассматриваемых энергетических установок и известных уравнений термодинамики.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Зависимость по определению энергетического эффекта применения схем с ДГА на котельных с ДВС.

2. Результаты энергетического анализа схем с ДГА на когенерационных котельных с выбором оптимального режима работы для схемы с наличием подогрева газа перед ДГА.

3. Комплексная методика технико-экономического анализа применения схем с ДГА на газопоршневых ДВС и влияния детандера на эффективность их работы.

4. Методика оценки влияния величины начального влагосодержания газа на эффективность работы ДГА. Анализ мер по повышению эффективности работы детандера для влажного природного газа.

5. Результаты расчета энергетического и экономического эффектов от применения оптимальной схемы с ДГА на действующей когенерационной котельной.

Личный вклад автора заключается в проведении обзора посвященных тематике работы литературных источников отечественных и зарубежных авторов; в постановке задач исследования; в разработке методик энергетического и технико-экономического анализа применения ДГА в когенерационных котельных с ДВС; в анализе влияния схем с ДГА на эффективность когенерационных котельных с ДВС; в оценке влияния величины начального влагосодержания на показатели работы детандера; в разработке подтвержденной патентом РФ схеме адсорбционной осушки газа перед детандером; в проведении расчетов ожидаемого энергетического и экономического эффектов от применения оптимальной схемы с ДГА для действующей когенерационной котельной с газопоршневыми ДВС.

Достоверность обеспечивается теоретическими методами исследования, основанными на применении апробированных зависимостей для определения основных показателей работы рассматриваемых энергетических установок и известных уравнений термодинамики.

Апробация результатов работы.

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях: 1- Всероссийская конференция «Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве» (Воронеж, 2013); 2-Международный форум «Крым Hi-Tech

2014», Севастополь, 2014; 3 - X Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Современные проблемы горно-металлургического комплекса Энергосбережение. Экология. Новые технологии» (Старый Оскол, 2013); 4- III международная конференция с элементами научной школы «Актуальные проблемы энергосбережения и эффективности в технических системах» (Тамбов, 2016).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, из них 2 статьи в журналах, входящим в перечень ВАК РФ, 1 патент на полезную модель, 1 публикация в издании, входящем в базу цитирования Web of Science, 4 в трудах конференций (в т. ч. один в электронном виде) и 2 в тезисах конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, библиографического списка из 94 наименований, содержит 114 страниц машинописного текста, 29 рисунков, 8 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и поставлены задачи исследования, раскрыта научная новизна результатов и показана практическая ценность работы.

В первой главе проведен анализ исследований применения ДГА на энергетических предприятиях. Показано, что подавляющее большинство работ посвящены применению схем с ДГА на ТЭС и отопительных котельных. Выявлено, что в настоящее время отсутствует комплексная методика выбора схем с ДГА для когенерационных котельных с учетом влияния процессов в детандере на эффективность работы ДВС и не проанализировано влияние величины начального влагосодержания природного газа на работу детандера.

Во второй главе предложены новые технические решения при использовании детандер-генераторных агрегатов в составе когенерационных котельных с двигателями внутреннего сгорания; разработана методика определения энергетической и технико-экономической эффективности когенерационных котельных с двигателями внутреннего сгорания при их совместной работе с ДГА; проведена оценка влияния схемных решений и режимов работы ДГА на энергетическую эффективность газопоршневых ДВС при различных температурах воздуха.

Для проведения технико-экономического анализа схем с ДГА необходимо на основании собранных данных о режимах работы ДВС и ДГА и климатических условиях района расположения котельной определить годовой энергетический и экономический эффекты от различных схем с ДГА, для чего требуется проведение энергетического анализа различных схем с ДГА и режимов их работы.

Особенностью работы газопоршневых ДВС является приблизительно постоянные значения к.п.д. по выработке электроэнергии в диапазоне значений температур топливной смеси от минимально допустимой до оптимальной. С ростом температуры смеси от оптимальной до максимально допустимой происходит падение к.п.д. ДВС на 2-3%. При относительно высоких температурах наружного воздуха, когда температура поступающей в двигатель топливной смеси превысит максимально допустимое значение, в схеме котельной предусматривается холодильная (обычно парокompрессионная) машина для охлаждения поступающей в двигатель топливной смеси. При оценке энергоэффективности когенерационной котельной для температур наружного воздуха, превышающих максимально допустимую температуру смеси, необходимо учитывать затраты электроэнергии на охлаждение топливной смеси в парокompрессионных холодильных машинах.

Для оценки влияния ДГА и подогрева газа на энергоэффективность все рассматриваемые схемы сравниваются с традиционным вариантом использования энергии газа, при котором поступающий на котельную природный газ дросселируется без применения подогрева и ДГА. Для схем с ДГА и дросселированием приняты одинаковыми расход поступающего в котлы газа и его температура на входе в горелки котлов, что позволяет считать график выработки тепловой энергии одинаковым для сравниваемых вариантов и не учитывать его при расчете энергетического эффекта от использования ДГА.

На основе принятых допущений предложена зависимость по нахождению значения приращения суммарной удельной полезной работы по выработке электроэнергии для схем с ДГА по сравнению с вариантом с дросселированием, приведенная к единице потребляемого котельной объема природного газа:

$$\Delta I_{\Sigma} = I_{\text{дга}} + g_{\text{др}} \cdot (I_{\text{двс}}^{\text{дга}} - I_{\text{двс}}^{\text{др}} - I_{\text{хол}}^{\text{дга}} + I_{\text{хол}}^{\text{др}}), \quad (1)$$

где $g_{\text{др}}$ – доля поступающего в ДВС топлива от общего расхода газа для схемы с дросселированием; $I_{\text{двс}}^{\text{дга}}, I_{\text{двс}}^{\text{др}}$ – удельные работы ДВС для схем с ДГА и дросселированием соответственно, Дж/нм³; $I_{\text{хол}}^{\text{дга}}, I_{\text{хол}}^{\text{др}}$ – удельные затраты электроэнергии на охлаждение топливной смеси для вариантов с ДГА и дросселированием соответственно, Дж/нм³.

В качестве энергетического эффекта от применения ДГА на действующей когенерационной котельной предложено принять экономию топлива при неизменных графиках выработки электрической мощности и тепловой энергии для сравниваемых схем.

На основе принятых положений получена формула по нахождению экономии топлива ΔG_{Σ} за рассматриваемый период времени:

$$\Delta G_{\Sigma} = G_{\Sigma}^{\text{др}} \cdot \frac{\Delta I_{\Sigma}}{I_{\text{дга}} + I_{\text{двс}}^{\text{дга}} - I_{\text{хол}}^{\text{дга}}}, \quad (2)$$

где $G_{\Sigma}^{др}$ – общий расход поступающего в котельную газа для схемы с дросселированием, нм^3 ; $l_{дга}$ – удельная работа ДГА, $\text{Дж}/\text{нм}^3$.

Знаменатель выражения (2) изменяется в пределах 10%, что позволяет сделать вывод о практически прямо пропорциональной зависимости экономии топлива от приращения суммарной удельной полезной работы. В качестве критерия оценки энергоэффективности при анализе применения схем с ДГА на котельных с разной электрической мощностью рекомендовано принять величину Δl_{Σ} .

В рамках решения поставленной задачи проведен энергетический анализ схем применения ДГА на когенерационной котельной на основе величины критерия Δl_{Σ} .

Расчеты проводились по зависимостям для идеального газа, при этом природный газ рассматривался как чистый метан. В качестве критерия энергетической эффективности для каждой схемы с ДГА принималась величина приращения суммарной удельной полезной работы по сравнению с вариантом с дросселированием.

Рассмотрены следующие варианты: ДГА без подогрева, ДГА с одним подогревателем (перед детандером и между его ступенями).

Наиболее простой схемой применения ДГА является схема без подогрева газа, которая позволяет использовать в летнее время охлаждающую способность детандера для повышения работы ДВС.

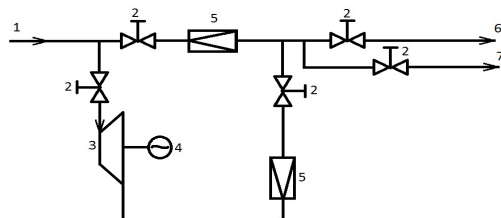


Рис.1. Принципиальная схема ДГА без подогрева газа: 1 - газопровод высокого давления; 2 - задвижки; 3 - детандер; 4 - электрогенератор; 5 - дросселирующее устройство; 6 - газопровод низкого давления к ДВС; 7 - газопровод низкого давления к котлам.

Для увеличения удельной работы детандера применяется подогрев топлива. Недостатком схемы с подогревом является уменьшение охлаждающего эффекта детандера, что сужает оптимальный диапазон температур наружного воздуха, требующийся для обеспечения максимального значения к.п.д. ДВС. При расположении подогревателя перед детандером температура газа на выходе из детандера будет минимальна, что благоприятно сказывается на работе двигателя внутреннего сгорания.

В дальнейшем при анализе схем с ДГА будем рассматривать только вариант с установкой подогревателя перед детандером (рис.2) при неизменной температуре подогреваемого газа на выходе из теплообменника. Удельная полезная работа детандера в этом случае постоянна и не зависит от температуры наружного воздуха.

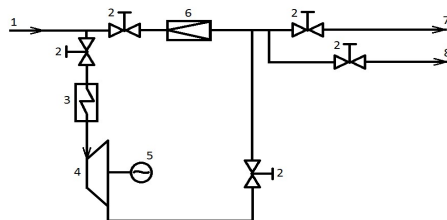


Рис.2. Принципиальная схема ДГА с подогревателем перед детандером для когенерационной котельной: 1-газопровод высокого давления; 2-задвижки; 3-подогреватель; 4-детандер; 5-электрогенератор; 6-дресселирующее устройство; 7-газопровод низкого давления к ДВС; 8- газопровод низкого давления к котлам.

Удельная полезная работа ДГА для схем с отсутствием подогрева и предварительным подогревом находится по известной зависимости:

$$l_{\text{дга}} = c'_p \cdot (T_{\text{г.вх}} - T_{\text{г.вых}}^{\text{действ}}) \cdot \eta_{\text{э.м.}} = c'_p \cdot T_{\text{г.вх}} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_{\text{г.вых}}}{P_{\text{г.вх}}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \cdot \eta_{\text{д}} \cdot \eta_{\text{э.м.}}, \quad (3)$$

где $P_{\text{г.вх}}, P_{\text{г.вых}}$ – давления газа на входе в детандер и выходе из него соответственно, Па; $T_{\text{г.вх}}, T_{\text{г.вых}}$ – температуры газа на входе в детандер и выходе из него соответственно, К; k – показатель адиабаты газа; $\eta_{\text{д}}$ – внутренний относительный к.п.д. детандера; $\eta_{\text{э.м.}}$ – электромеханический к.п.д. ДГА; c'_p – изобарная объемная теплоемкость газа, Дж/($\text{м}^3 \cdot \text{К}$). Температура газа на входе в детандер при отсутствии подогрева равна температуре газа на входе в котельную; при наличии предварительного подогрева температура газа на входе в детандер равна температуре газа после подогревателя.

Удельная полезная работа ДВС находится по известной зависимости:

$$l_{\text{двс}} = Q_p^{\text{н}} \cdot \eta_{\text{двс}}, \quad (4)$$

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

Температура топливной смеси в данном случае будет определяться по известной формуле:

$$t_{\text{см}} = \frac{\rho_{\text{г}} \cdot c_{\text{г}} \cdot t_{\text{г}} + \bar{V}_{\text{воз}} \cdot \rho_{\text{воз}} \cdot c_{\text{воз}} \cdot t_{\text{воз}}}{\rho_{\text{г}} \cdot c_{\text{г}} + \bar{V}_{\text{воз}} \cdot \rho_{\text{воз}} \cdot c_{\text{воз}}}, \quad (5)$$

где $\rho_{\Gamma}, \rho_{\text{воз}}$ – плотности при нормальных условиях газа и воздуха соответственно, кг/м³; $c_{\Gamma}, c_{\text{воз}}$ – удельные массовые изобарные теплоемкости газа и воздуха соответственно, Дж/(кг·К); $t_{\Gamma}, t_{\text{воз}}$ – температуры газа и воздуха соответственно, °С; $\bar{V}_{\text{воз}}$ – действительный расход воздуха, необходимый для сжигания 1 нм³ газа, нм³/нм³.

Уменьшение температуры топливной смеси при применении детандера с учетом (3) и (5) можно вычислить по формуле:

$$\Delta t_{\text{см}} = \frac{\rho_{\Gamma} \cdot c_{\Gamma} \cdot (t_{\Gamma, \text{ВХ}} - t_{\Gamma, \text{ВЫХ}})}{\rho_{\Gamma} \cdot c_{\Gamma} + \rho_{\text{воз}} \cdot c_{\text{воз}} \cdot \bar{V}_{\text{воз}}} = \frac{l_{\text{дга}}}{c'_{\text{р}} \cdot \eta_{\text{э.м.}}} \cdot \frac{\rho_{\Gamma} \cdot c_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma} \cdot c_{\Gamma} + \bar{V}_{\text{воз}} \cdot \rho_{\text{воз}} \cdot c_{\text{воз}}}. \quad (6)$$

Затраты электроэнергии в парокompрессионных холодильных машинах на охлаждение топливной смеси до максимально допустимой температуры, приведенные к 1 нм³ газа, будут определяться по формуле:

$$l_{\text{хол}} = \frac{q_{\text{хол}}}{\varepsilon_{\text{хол}}} = \frac{(\rho_{\text{воз}} \cdot c_{\text{воз}} \cdot \bar{V}_{\text{воз}} + \rho_{\Gamma} \cdot c_{\Gamma}) \cdot (t_{\text{см}} - t_{\text{см}}^{\text{max}})}{\varepsilon_{\text{хол}}}, \quad (7)$$

где $q_{\text{хол}}$ – требуемая удельная холодопроизводительность, Дж/нм³; $\varepsilon_{\text{хол}}$ – холодильный коэффициент; $t_{\text{см}}^{\text{max}}$ – максимально допустимая температура топливной смеси, °С.

Расчеты проводились для величин входного абсолютного давления от 7 до 13 бар, выходное давление равно 1,2 бар. Принято, что для подогрева топлива использованы уходящие газы ДВС. Расчеты проводились без учета потерь давления газа в теплообменниках-подогревателях. Температура газа на выходе из теплообменника принимается равной +100°С, температура газа для схемы с дросселированием принята равной температуре окружающего воздуха. Коэффициент избытка воздуха при сжигании топлива принят 1,1. Значения к.п.д. ДВС приняты на основе данных об эксплуатации двигателя «Caterpillar G3516»: оптимальное значение в промежутке температур топливной смеси от -30°С (минимально допустимая температура) до +25°С (оптимальная температура) равно 38%, при температурах смеси от +25 до +35°С (максимально допустимая температура) принято линейное уменьшение к.п.д. до 36%. Величина внутреннего относительного к.п.д. детандера принята равной 75%, электромеханического к.п.д. 97%. При расчете удельных затрат электрической энергии на охлаждение топливной смеси в парокompрессионных холодильных машинах при использовании в качестве хладагента хладона R22 холодильный коэффициент составил 2,8.



Рис.3. Зависимость величины приращения суммарной удельной полезной работы от температуры наружного воздуха для схемы с ДГА без подогрева газа при начальном давлении 7 атм и доли поступающего в ДВС топлива $g=0,1$.



Рис.4. Зависимость величины приращения суммарной удельной полезной работы от температуры наружного воздуха для схемы с ДГА без подогрева газа при начальном давлении 7 атм и доли поступающего в ДВС топлива $g=1$.

Вариант применения ДГА без подогрева (рис.1) из представленных выше схем позволяет наиболее полно использовать хладоресурс детандера. Стоит отметить, что схема с ДГА без подогрева названа так условно, так как подогрев топлива при низких температурах наружного воздуха для обеспечения минимально допустимой температуры топливной смеси необходим. В дальнейшем принимается, что нагрев газа в теплообменниках после детандера осуществляется внутренними энергоресурсами котельной и не требует дополнительных затрат топлива и электроэнергии.

Зависимость энергетического эффекта от температуры наружного воздуха можно разбить на 4 условные области:

1) Температура наружного воздуха меньше оптимальной температуры смеси. В этом случае для сравниваемых схем с дросселированием и ДГА двигатель внутреннего сгорания

работает в режиме с максимальным значением к.п.д., а приращение суммарной удельной полезной работы равно удельной работе детандера.

2) Величина температуры наружного воздуха находится в пределах от оптимальной до максимально допустимой температуры смеси. В этом случае приращение суммарной удельной полезной работы равно сумме удельной работы детандера и изменения удельной работы двигателя внутреннего сгорания. Величина удельной полезной работы ДВС для варианта с дросселированием при повышении температуры воздуха будет уменьшаться. При использовании ДГА удельная полезная работа ДВС остается постоянной до достижения значения температуры наружного воздуха, соответствующего оптимальному значению температуры топливной смеси, после чего удельная работа ДВС начинает уменьшаться, хотя и не так быстро, как для схемы с дросселированием, что обеспечивает повышение разницы удельных работ двигателя с ростом температуры наружного воздуха.

3) Температура наружного воздуха больше максимально допустимой температуры смеси. В этом случае приращение суммарной удельной полезной работы находится как сумма удельной работы детандера, приращения удельной работы ДВС и разницы удельных затрат электроэнергии на охлаждение смеси. Удельная полезная работа ДВС для варианта с дросселированием при повышении температуры воздуха будет поддерживаться постоянной за счет охлаждения топливной смеси до максимально допустимой температуры. Удельная полезная работа ДВС для схемы с ДГА будет уменьшаться с ростом температуры воздуха, что приведет к снижению разницы удельных полезных работ ДВС. С другой стороны, использование хладоресурса газа после детандера позволяет добиться экономии электроэнергии на охлаждение топливной смеси. В итоге суммарное приращение удельной полезной работы будет уменьшаться с ростом температуры за счет снижения разницы удельных полезных работ ДВС, которое не компенсируется экономией электроэнергии на охлаждение смеси.

4) Температура наружного воздуха обеспечивает для схемы с ДГА температуру топливной смеси, большей максимально допустимого значения. В этом случае удельные полезные работы ДВС для схем с дросселированием и использованием ДГА одинаковы. Приращение суммарной удельной полезной работы будет возрастать за счет повышения удельной работы детандера и экономии электроэнергии на охлаждение топливной смеси.

Общий вид зависимости энергетического эффекта от температуры наружного воздуха для схемы с подогревом газа будет идентичен аналогичной зависимости для схемы без подогрева.

Для выявления оптимальной схемы применения ДГА необходимо сопоставить величины приращения суммарных удельных полезных работ для схем с использованием

подогрева и без подогрева для рассматриваемых диапазонов температуры наружного воздуха.

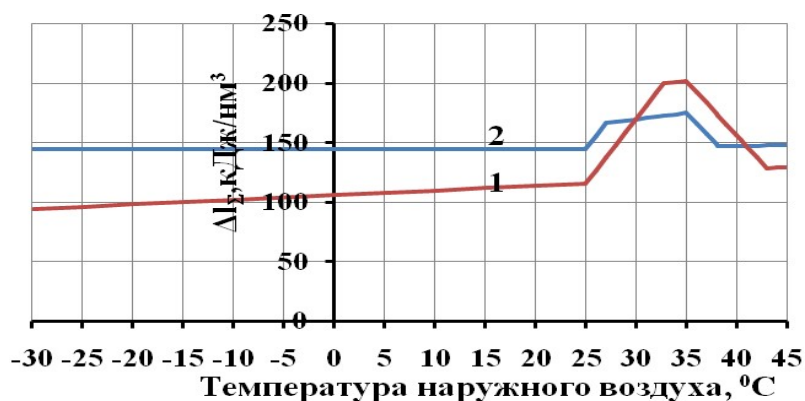


Рис.5. Зависимость величины приращения суммарной удельной полезной работы от температуры наружного воздуха при начальном давлении 7 атм и доли поступающего в ДВС топлива $g=0,1$: 1-для схемы с ДГА без подогрева; 2-для схемы с ДГА с подогревом.

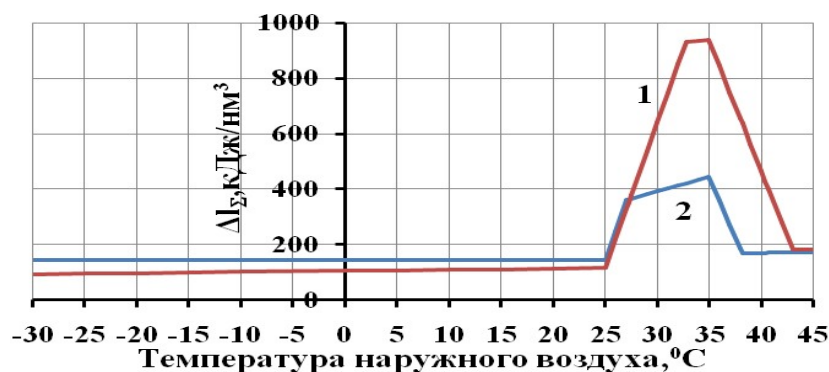


Рис.6. Зависимость величины приращения суммарной удельной полезной работы от температуры наружного воздуха при начальном давлении 7 атм и доли поступающего в ДВС топлива $g=1$: 1-для схемы с ДГА без подогрева; 2-для схемы с ДГА с подогревом.

Результаты сравнения схем с применением подогрева и без подогрева позволяют сделать следующие выводы: 1 - для температур воздуха, ниже определенного значения ($t_{откл}$), при котором величины приращений суммарных удельных работ схем с подогревом и без него равны, применение подогрева энергетически выгодно; 2 - для температур наружного воздуха, превышающих $t_{откл}$, необходимо отключить подогрев, так как уменьшение удельной работы двигателя из-за снижения хладоресурса детандера при применении подогрева превысит выигрыш от увеличения удельной работы детандера.

Наибольшим энергетическим эффектом будет обладать схема с наличием подогрева, работающая по режиму с отключением подогрева при высоких температурах наружного воздуха для обеспечения максимального значения приращения суммарной удельной полезной работы.

Заключительным этапом технико-экономического анализа является расчет на основе результатов энергетического анализа основных экономических показателей рассматриваемых схем. На основании значений экономических показателей производится выбор наиболее эффективной схемы применения ДГА на когенерационной котельной.

В третьей главе исследовано влияние влагосодержания газа на величину удельной полезной работы детандера, проведен анализ эффективности мер по устранению ограничений, накладываемых на работу детандера содержанием в газе паров воды.

При уменьшении температуры газа в детандере ниже точки росы для данных значений давления и влагосодержания возможно образование кристаллогидратов, что может ухудшить работу детандера и расположенного после него газопровода. Для определения допустимого давления газа на выходе из детандера, соответствующего началу образования кристаллогидратов, необходимо учитывать как изменение температуры и давления газа в процессе расширения в детандере, так и величину начального влагосодержания d_0 .

При использовании влажного газа в схеме с ДГА без подогрева (рис.1) после детандера должно быть предусмотрено дросселирующее устройство. Если допустимое значение давления газа при данном влагосодержании больше требуемого давления газа в топливосжигающих агрегатах, то расширение в детандере происходит до допустимого давления, после чего газ дросселируется до требуемого давления. В этом случае в детандере использует не весь располагаемый перепад давлений газа, что уменьшает энергетический эффект от применения ДГА.

В работе предложена методика определения значений максимального влагосодержания для процесса расширения в детандере. Условие равенства значений максимального и начального влагосодержаний соответствует точке росы и определяет минимально допустимое значение давления, до которого можно расширять газ в детандере.

Для оценки влияния начального влагосодержания на работу детандера необходим критерий оценки, определяющий эффективность использования потенциальной энергии газа. В качестве такого критерия введен условный коэффициент эффективности работы детандера $k_{дет}$. Принято, что максимальное использование энергии давления газа реализуется при его расширении в детандере до значения давления в топливосжигающих агрегатах.

Введен коэффициент эффективности работы детандера $k_{дет}$, который находится как:

$$k_{дет} = \frac{l_{дга}^{действ}}{l_{дга}^{max}}, \quad (8)$$

где $l_{дга}^{действ}$ – действительная удельная полезная работа ДГА при расширении газа до минимально возможного давления из условия недопущения образования кристаллогидратов,

Дж/нм³; $l_{\text{дга}}^{\text{max}}$ – действительная удельная полезная работа ДГА при расширении газа до давления в топливосжигающих агрегатах, Дж/нм³.

Максимальное значение начального влагосодержания d_0^{max} соответствует температуре точки росы -10°C при давлении газа 3,92 МПа (СТО Газпром 089-2010), что составляет приблизительно 82 мг/кг газа.

Коэффициент $k_{\text{дет}} = 1$ вплоть до определенного критического значения начального влагосодержания $d_{\text{кр}}$, после чего начинает уменьшаться. Для $d_{\text{кр}} \leq d_0 \leq d_0^{\text{max}}$ коэффициент $k_{\text{дет}}$ будет уменьшаться с ростом величины начального влагосодержания.

Результаты расчетов показывают, что при отрицательных температурах газа для рассматриваемого интервала значений входного давления добиться $k_{\text{дет}} = 1$ можно только при начальном влагосодержании газа менее 20 мг/кг.

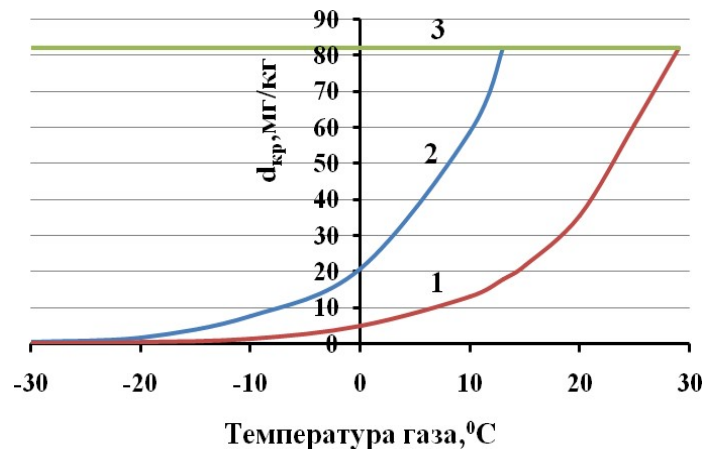


Рис.7. Зависимость $d_{\text{кр}}$ от температуры газа на входе в детандер: 1- для значения входного давления газа 13 атм; 2- для значения входного давления газа 7 атм; 3- линия максимально допустимого влагосодержания.

Величина $d_{\text{кр}}$ увеличивается с ростом входной температуры и уменьшается с ростом начального давления. Результаты расчетов показывают, что минимальная температура подогрева, при которой детандер будет использовать весь располагаемый перепад давления, должна находиться для рассматриваемых интервалов значения входного давления в пределах от 14 до 29°C. Таким образом, использование предварительного подогрева газа позволяет избежать ограничений по величине выходного давления.

При отсутствии возможности предварительного подогрева рекомендовано запатентованное решение о применении предварительной адсорбционной осушки газа. Применение осушки целесообразно для схем с ДГА без подогрева при относительно высоких

значениях влагосодержания в период низких температур наружного воздуха, так как позволяет снять ограничения по величине выходного давления, которые существенно уменьшают удельную работу ДГА.

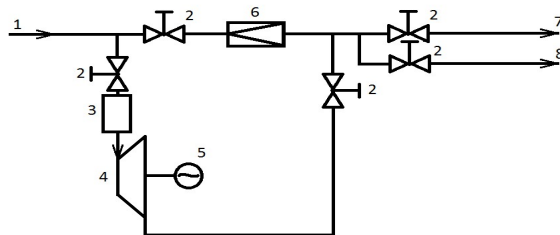


Рис.8. Принципиальная схема ДГА с предварительной осушкой: 1 - газопровод высокого давления; 2 - задвижки; 3 - блок осушки; 4 - детандер; 5 - электрический генератор; 6-дресселирующее устройство; 7-газопровод низкого давления к ДВС; 8 - газопровод низкого давления к котельной.

Адсорбционная осушка газа заключается в поглощении требуемого количества влаги специальным твердым веществом – сорбентом, с последующей регенерацией – процессом удаления поглощенного вещества из сорбента. Осушка является наиболее действенным способом снятия ограничений по параметрам работы детандера, накладываемых наличием в газе влаги, так как устраняет не условия образования гидратов, а саму причину – содержащиеся в газе пары воды.

Недостатком осушки является уменьшение величины давления газа на входе в детандер после прохождения им слоя адсорбента, что уменьшает удельную работу ДГА.

Были проведены оценочные расчеты для наиболее характерных типов адсорбента. Расчеты показывают, что при диаметре гранул поглотителя свыше 1 мм максимально возможные потери давления составят незначительную величину (менее 0,6 бар), что позволяет получить коэффициент $k_{дет}$ свыше 0,95. Таким образом, влияние потерь давления газа на эффективность работы детандера можно считать незначительным.

Стоит отметить, что при известном значении начального влагосодержания газа решение о применении предварительной осушки в схемах с ДГА должно базироваться на комплексном технико-экономическом расчете, учитывающем срок окупаемости адсорбционной осушки с учетом вложенных средств.

В четвертой главе проведена оценка ожидаемых энергетического и экономического эффектов от реализации схемы с ДГА на действующей когенерационной котельной.

Для проведения оценки энергетического эффекта от применения различных схем была выбрана когенерационная котельная для обеспечения электрической и тепловой

энергией птицефабрики «Липецкая». Выработка электроэнергии происходит в трех двигателях внутреннего сгорания – газопоршневых агрегатах фирмы «Caterpillar G3516», номинальной электрической мощностью по 1,03 МВт. Давление природного газа составляет 7 атм. Для дополнительной выработки теплоты установлены два водогрейных котла «MGM-I-1200» тепловой мощностью по 1,2 МВт. Для получения пара на технологические нужды установлены два паровых котла марки THS20 производительностью по 2 т/ч с давлением пара 10 атм.

Для расчетов взяты данные за 2015 год. Годовой расход газа составил 5,38 млн. нм^3 . На основании имеющихся данных для каждого месяца вычислена доля поступающего в ДВС топлива. При определении ожидаемого энергетического эффекта для каждого месяца при известных значениях выработки электроэнергии рассчитывалась экономия топлива. Для расчета энергетического эффекта принята схема с предварительным подогревом, работающая по комбинированному режиму, с отключением подогрева в наиболее жаркие дни лета при превышении температурой наружного воздуха величины 27°C .

На основании проведенных расчетов выявлено, что для месяцев с температурой наружного воздуха, обеспечивающих круглосуточно температуру смеси меньше оптимальной (25°C), ожидаемая месячная экономия топлива составит 4600-5200 нм^3 . Величина к.п.д. ДВС в этот период составляет 37,9-38,1%, незначительно уменьшаясь с ростом среднемесячной температуры воздуха. Для летних месяцев по климатическим условиям 2015 г. детандер позволял поддерживать температуру топливной смеси в оптимальных границах, что обеспечивало работу ДВС с максимальным значением к.п.д. Ожидаемая месячная экономия топлива в летний период составляет 6600 - 9800 нм^3 .

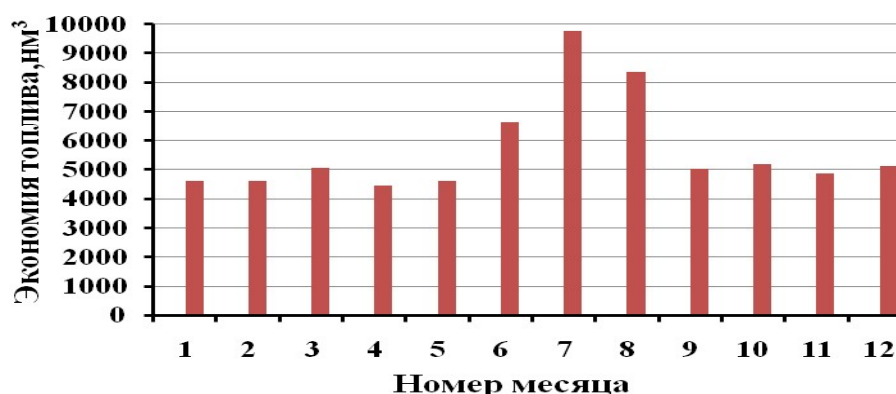


Рис.9. Ожидаемая экономия топлива по месяцам.

Суммарная ожидаемая годовая экономия топлива при применении схемы с ДГА и подогревом топлива уходящими газами равна 68,43 тыс. нм^3 , что составляет 1,27% от годового расхода природного газа. Проведена оценка ожидаемого экономического эффекта. Показано, что применение данной схемы окупится за 2-3 года.

Выводы:

1. Получена зависимость по расчету энергетического эффекта от использования ДГА на когенерационных котельных с ДВС. Предложено в качестве энергетического эффекта от применения различных схем с ДГА на когенерационных котельных с ДВС принимать величину экономии топлива на единицу потребляемого котельной объема природного газа по сравнению с вариантом с дросселированием при одинаковых графиках электрической и тепловой нагрузок для сравниваемых схем. Показано, что энергетический эффект от применения ДГА в первом приближении прямо пропорционален значению приращения суммарной удельной полезной работы. При проведении энергетического анализа схем с ДГА на котельных с разной электрической мощностью энергоэффективность рекомендовано оценивать по значению приращения суммарной удельной полезной работы.

2. Проведен энергетический анализ использования различных схем с ДГА и предложена методика проведения технико-экономического анализа для выбора схемы применения ДГА на когенерационных котельных с ДВС. Выделены 4 области зависимости величины энергетического эффекта от температуры наружного воздуха. Показано, что наибольшим энергетическим эффектом будет обладать схема с подогревом газа перед детандером при температурах наружного воздуха до значения $t_{откл}$, при котором величины суммарных удельных полезных работ для схем с подогревом газа и без подогрева сравниваются, и с отключением подогрева газа при более высоких температурах воздуха

3. Исследовано влияние влагосодержания газа на величину удельной полезной работы детандера. Предложен коэффициент эффективности работы детандера для влажного газа, учитывающий ограничения давления газа на выходе из детандера, накладываемые условием предотвращения образования кристаллогидратов. Показано, что использование для подогрева уходящих газов ДВС позволяет полностью снять ограничения по величине выходного давления. Выявлено, что для схемы с отсутствием подогрева при низких температурах наружного воздуха требуется увеличить выходное давление для предотвращения образования кристаллогидратов, что снизит удельную работу детандера. В этом случае для использования в детандере располагаемого перепада давлений рекомендуется запатентованная схема с применением предварительной адсорбционной осушки газа. Проведенная оценка показывает, что потери давления при прохождении газа через слой сорбента, имеющего размер гранул поглотителя свыше 1 мм, незначительны и практически не влияют на эффективность работы детандера.

4. Для когенерационной котельной птицефабрики «Липецкая» проведена оценка ожидаемого энергетического и экономического эффекта от использования оптимальной схемы с ДГА. Суммарная ожидаемая годовая экономия топлива при применении схемы с

ДГА и подогревом топлива уходящими газами равна 68,43 тыс. нм³, что составляет около 1,27% от годового расхода газа. Ожидаемый срок окупаемости составит 2-3 года.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Картель, А.Ю. Исследование особенностей применения детандер-генераторных агрегатов на когенерационных котельных с двигателями внутреннего сгорания / А.Ю. Картель, В.Я. Губарев, А.Г. Арзамасцев // Вестник ЧГУ. – 2018.–№1 (82). –С.20-27.

2. Картель, А.Ю. Разработка схемы и эксергетический анализ работы ДГА с возможностью одновременного получения электроэнергии и «глубокого холода» / А.Ю. Картель, В.Я. Губарев // Вестник ВГУИТ. – 2014. – №3.– С.40-44.

Публикации в изданиях, входящих в базу цитирования Web of Science

3. Картель, А.Ю. 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.

Публикации в других изданиях

4. Картель, А.Ю. Анализ влияния входных параметров на эффективность работы детандер-генераторного агрегата с возможностью одновременного получения электроэнергии и холода / А.Ю. Картель, В.Я. Губарев, А.Г. Арзамасцев // Вестник ТГТУ. – 2016.–№1.–С.45-52.

5. Картель, А.Ю. Анализ схем подогрева газа при детандировании / А.Ю. Картель, В.Я. Губарев // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве: труды Всеросс. конф. Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет». – 2013. – С. 172-173.

6. Картель, А.Ю. Сравнительный анализ схемы с ДГА с возможностью одновременного получения электроэнергии и «глубокого холода» / А.Ю. Картель, В.Я. Губарев // Международный форум «Крым Hi-Tech – 2014». – С. 89-92.

7. Картель, А.Ю. Эксергетический анализ влияния сезонности и входных параметров на работу установки с ДГА с возможностью одновременного получения электроэнергии и «глубокого холода» / А.Ю. Картель, В.Я. Губарев // Областная научно-практическая конференция по проблемам технических наук. – Липецкий государственный технический университет. – Липецк, 2014. – С. 73-74.

8. Картель, А.Ю. Возможные источники подогрева газа при использовании детандер-генераторного агрегата/ А.Ю. Картель, В.Я. Губарев // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Энергосбережение. Экология. Новые технологии: материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 25-27 ноября 2013 г. – С. 68-70.

9. Картель, А.Ю. Детандер-генераторные агрегаты и области их применения / А.Ю. Картель, В.Я. Губарев // Областная научно-практическая конференция по проблемам технических наук. Липецкий государственный технический университет. Липецк.– 2013 г. – С. 55-56.

10. Картель, А.Ю. Исследование эффективности применения детандер-генераторного агрегата и схемы подогрева газа на энергетических предприятиях / А.Ю. Картель, В.Я. Губарев, А.Г. Арзамасцев // III международная конференция с элементами научной школы «Актуальные проблемы энергосбережения и эффективности в технических системах». – Тамбов, 2016. – С. 168-169.

11. **Патент на полезную модель №162579.** Детандер-генераторный агрегат: заявка №2014148549/06, В.Я.Губарев, А.Ю.Картель; заявл.21.10.2014, реш.20.06.2016., бюл.№17.