

### ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СХЕМ С ДЕТАНДЕР-ГЕНЕРАТОРНЫМИ АГРЕГАТАМИ НА КОГЕНЕРАЦИОННЫХ КОТЕЛЬНЫХ С ГАЗОПОРШНЕВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

**В.Я. Губарев**, [gv\\_lipetsk@rambler.ru](mailto:gv_lipetsk@rambler.ru)

**А.Г. Арзамасцев**, [arzamastcev-ag@mail.ru](mailto:arzamastcev-ag@mail.ru)

**А.Ю. Картель**, [zettervam@gmail.com](mailto:zettervam@gmail.com)

*Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия*

**Аннотация.** В статье рассмотрены режимы работы различных схем использования детандер-генераторных агрегатов на когенерационных котельных с газопоршневыми двигателями внутреннего сгорания. Показано, что при низких температурах воздуха в схеме с отсутствием предварительного подогрева газа могут выпадать кристаллогидраты в газопроводе после детандера. Для недопущения этого явления предложен режим с поддержанием более высокого выходного давления в детандере, чем минимально допустимое давление по условию недопущения образования кристаллогидратов. Показано, что при данном режиме уменьшится работа детандера. Проведен анализ влияния начальных параметров газа на величину работы детандера. Выявлено, что схема с подогревом газа перед детандером позволяет полностью реализовать располагаемый перепад давлений. Дополнительным преимуществом применения предварительного подогрева является увеличение удельной работы детандера за счет более высокой входной температуры газа. Показано, что при определенном значении температуры наружного воздуха в летний период использование подогрева газа может стать невыгодным из-за уменьшения коэффициента полезного действия двигателей внутреннего сгорания для схемы с подогревом. При более высоких температурах наружного воздуха предложен режим с отключением подогрева газа. Для когенерационной котельной с 3 газопоршневыми двигателями внутреннего сгорания проведен расчет годовой и среднемесячной экономии топлива от применения различных схем детандер-генераторных агрегатов по сравнению со схемой с дросселированием газа. Наибольший энергетический эффект от применения предварительного подогрева газа будет в зимний период, так как подогрев позволяет снять ограничения по величине выходного давления газа и тем самым полностью использовать располагаемый перепад давлений в детандере. Показано, что подогрев газа перед детандером до 100 °С позволяет увеличить годовую экономию топлива примерно в 1,4 раза по сравнению с использованием схемы с детандером без подогрева.

**Ключевые слова:** детандер-генераторный агрегат, когенерационная котельная, удельная полезная работа, экономия топлива

**Для цитирования:** Губарев В.Я., Арзамасцев А.Г., Картель А.Ю. Исследование режимов работы схем с детандер-генераторными агрегатами на когенерационных котельных с газопоршневыми двигателями внутреннего сгорания // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2022. Т. 22, № 4. С. 77–86. DOI: 10.14529/power220409

## INVESTIGATION OF OPERATING MODES OF CIRCUITS WITH EXPANDER-GENERATOR UNITS IN COGENERATION BOILERS WITH GAS-PISTON INTERNAL COMBUSTION ENGINES

V.Ya. Gubarev, [gv\\_lipetsk@rambler.ru](mailto:gv_lipetsk@rambler.ru)

A.G. Arzamastsev, [arzamastcev-ag@mail.ru](mailto:arzamastcev-ag@mail.ru)

A.Yu. Kartel, [zettzervam@gmail.com](mailto:zettzervam@gmail.com)

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

**Abstract.** In this mode, due to a decrease in the pressure drop used in the expander, useful effect has been shown to decrease. The paper considers the operating modes of various schemes for the use of expander-generator units in cogeneration boilers with gas-piston internal combustion engines. In the scheme with the absence of gas heating before the expander at low air temperatures, crystallohydrates may fall out after the expander. In order to prevent this phenomenon, a mode with gas throttling after the expander is proposed. In this mode, due to a decrease in the pressure drop used in the expander, its useful effect will decrease. The study also shows that the scheme with gas heating in front of the expander enables the available pressure drop to be fully realised. At a certain outdoor air temperature in the summer, the use of gas heating may become unprofitable due to a decrease in the efficiency of internal combustion engines for a heated circuit. At higher outdoor temperatures, the study proposes a mode with gas heating turned off. Annual and average monthly fuel economy from the use of various schemes of expander-generator units for a cogeneration boiler house in comparison with the scheme with drosseling is calculated. It is shown that heating the gas before the expander to 100 °C allows annual fuel economy to be increased by about 1.4 times, when compared to a scheme using an expander without heating.

**Keywords:** expander-generator unit, cogeneration boiler house, specific useful work, specific fuel economy

**For citation:** Gubarev V.Ya., Arzamastsev A.G., Kartel A.Yu. Investigation of operating modes of circuits with expander-generator units in cogeneration boilers with gas-piston internal combustion engines. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2022;22(4):77–86. (In Russ.) DOI: 10.14529/power220409

### Актуальность темы исследования

В настоящее время в Российской Федерации согласно ФЗ № 271 при проектировании нового энергетического объекта приоритетным является его способность работать по принципу когенерации, то есть обеспечивать одновременную выработку тепловой и электрической энергии. Когенерационная котельная (по сути мини-ТЭЦ) с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) отвечает этим требованиям и в местах, где возможно прямое подключение к газопроводу, экономически выгодна и имеет малый срок окупаемости [1, 2].

Одним из способов повышения эффективности работы такой котельной является использование избыточного давления поступающего в котельную газа в установленном перед основным оборудованием детандер-генераторном агрегате (ДГА). В ДГА за счет снижения давления газа до величины чуть больше атмосферного вырабатывается электрическая энергия. На практике используются следующие схемы установки ДГА: с предварительным подогревом газа перед детандером и без подогрева.

После расширения в детандере газ сильно остывает, что может приводить к выпадению кристаллогидратов в газопроводе после ДГА и ухудшить условия эксплуатации газопроводов. При от-

сутствии подогрева газа перед ДГА необходимо разработать режим, позволяющий избежать выпадения кристаллогидратов. Подогрев газа до входа в ДГА позволит повысить работу детандера, но в то же время может снизить КПД ДВС в летний период за счет повышения температуры топливной смеси. Поэтому для эффективного применения схемы с подогревом требуется разработать оптимальный режим подогрева в летний период, обеспечивающий максимальный энергетический эффект.

Целью данной статьи является исследование режимов работы различных схем с ДГА с учетом недопущения выпадения кристаллогидратов и выбор на основе проведенного исследования наиболее энергоэффективной схемы с оптимальным режимом работы.

### Научная новизна статьи

В работе предложен метод определения минимально допустимого выходного давления газа в ДГА с учетом недопущения возможности выпадения кристаллогидратов в газопроводе после детандера. Для схем ДГА с предварительным подогревом газа сформулировано условие по определению значения температуры отключения подогрева в летнее время.

### Обзор исследований по данной теме

Использованию избыточного давления природного газа для производства электрической энергии посвящены работы зарубежных и отечественных авторов [3–19].

Особенности выработки электроэнергии в детандер-генераторном агрегате рассмотрены в работе [3].

В работах авторов [4–7] рассмотрены возможные схемы детандера с подогревом газа на ГРС, показана возможность использования для подогрева низкопотенциальных возобновляемых энергоресурсов.

В статьях [8–11] приведены данные экспериментальных исследований применения ДГА на паротурбинных циклах ТЭЦ, определена энергетическая эффективность использования детандера.

В работе [12] проанализированы термодинамические аспекты использования ДГА на ТЭЦ, показана важность оптимального выбора марки ДГА при сезонных колебаниях потребления газа. В трудах [13, 14] подробно рассмотрена эффективность применения подогрева газа в схемах с детандером, проанализированы различные варианты установки подогревателя.

Из отечественных авторов большое количество работ выполнено В.С. Агабабовым. В его работах [15–17] отмечается необходимость учитывать влияние параметров газа после детандера на работу газопотребляющих агрегатов. Указано, что при расширении газа в детандере при определенном начальном влагосодержании на выходе из детандера происходит процесс образования кристаллогидратов, что может неблагоприятно сказаться на эксплуатации детандера и участка газопровода после него.

Однако в указанных выше работах не проанализировано влияние начальных параметров газа на работу детандера для схемы без подогрева при соблюдении условия недопущения образования кристаллогидратов. Также данные работы посвящены применению схем с детандером на ТЭЦ. В данных схемах повышение температуры предварительного подогрева газа позволит увеличить энергетический эффект. Однако особенностью применения ДГА на когенерационных котельных с ДВС является уменьшение КПД двигателя при температурах топливной смеси выше оптимального значения, что может потребовать отключения подогрева при определенных условиях.

В работах [18, 19] рассмотрен ожидаемый энергетический эффект от использования ДГА с предварительным подогревом на когенерационных котельных с ДВС и на ТЭЦ, однако без учета возможности отключения подогрева для получения максимальной суммарной удельной полезной работы при разных температурах газа и воздуха.

Разработка оптимальных режимов работы схем с ДГА на когенерационных котельных с ДВС с учетом специфики работы ДВС и соблюдения условия недопущения образования кристаллогидратов позволяет улучшить условия эксплуатации газопровода при применении детандера, повысить энергетическую эффективность котельных и добиться экономии топлива.

### Практическая значимость

Предложенные выводы можно использовать при проектировании применения ДГА на строящихся и действующих когенерационных котельных. На основании предложенного метода определения минимально допустимого давления газа после детандера для схем с отсутствием подогрева разработан режим с дросселированием газа после детандера, исключающий возможность выпадения кристаллогидратов после детандера. Для схем с подогревом разработан режим, позволяющий достичь максимального энергетического эффекта при различных температурах газа.

### Методы исследования

Рассмотрим два варианта использования детандера на когенерационной котельной с газопоршневыми ДВС: с использованием предварительного подогрева и без подогрева.

На рис. 1, 2 представлены схемы ДГА без подогрева газа и с подогревом газа для когенерационной котельной.

Энергетический эффект от использования выбранных схем применения детандера определяется при их сравнении с традиционным вариантом, при котором газ дросселируется до давления чуть больше атмосферного. Энергетический эффект от применения ДГА на когенерационных котельных с ДВС заключается в уменьшении расхода топлива по сравнению с традиционным вариантом с дросселированием газа перед топливосжигающими агрегатами, при этом графики выработки электроэнергии и отпуска теплоты в обоих вариантах приняты одинаковыми [19].

При расчетах примем содержание метана в природном газе свыше 95 %. В этом случае газ можно считать как метан и применять при расчетах формулы для идеального газа [20]. Из-за высокой протяженности магистральных газопроводов разница между температурами поступающего в котельную газа и воздуха невелика и практически не влияет на температуру топливной смеси, которая из-за высокого расхода воздуха на сжигание (свыше  $10 \text{ м}^3$  на  $1 \text{ м}^3$  газа) определяется в первую очередь температурой воздуха. В дальнейшем будем считать равными температуру газа и наружного воздуха. Только после охлаждения газа в детандере отличие температуры топливной смеси от температуры воздуха необходимо будет учитывать.

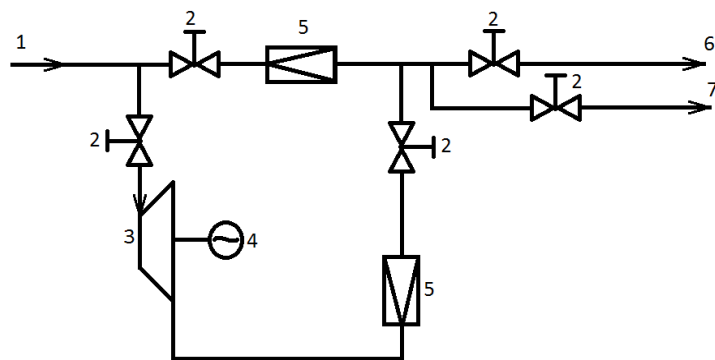


Рис. 1. Принципиальная схема ДГА без подогрева газа для когенерационной котельной: 1 – газопровод высокого давления; 2 – задвижки; 3 – детандер; 4 – электрогенератор; 5 – дросселирующее устройство; 6 – газопровод низкого давления к ДВС; 7 – газопровод низкого давления к котельной

Fig. 1. Schematic diagram of a EGU gas boiler without gas heating for a cogeneration boiler house: 1 – high-pressure gas pipeline; 2 – valves; 3 – expander; 4 – electric generator; 5 – throttling device; 6 – low-pressure gas pipeline to the internal combustion engine; 7 – low-pressure gas pipeline to the boiler house

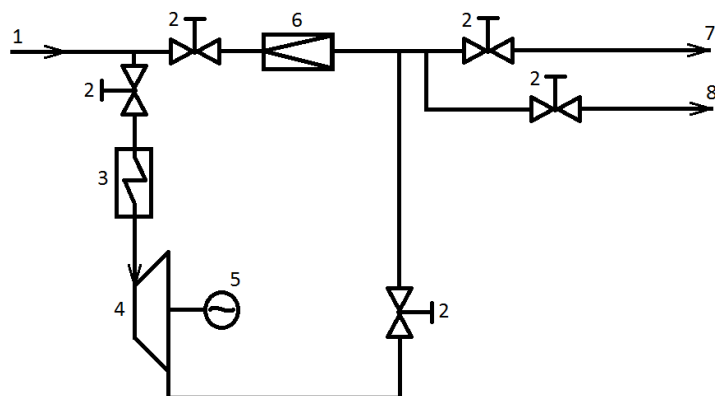


Рис. 2. Принципиальная схема ДГА с подогревателем перед детандером для когенерационной котельной: 1 – газопровод высокого давления; 2 – задвижки; 3 – подогреватель; 4 – детандер; 5 – электрогенератор; 6 – дросселирующее устройство; 7 – газопровод низкого давления к ДВС; 8 – газопровод низкого давления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

Fig. 2. Schematic diagram of a EGU with a heater in front of the expander for a cogeneration boiler house: 1 – high-pressure gas pipeline; 2 – valves; 3 – heater; 4 – expander; 5 – electric generator; 6 – throttling device; 7 – low-pressure gas pipeline to the internal combustion engine; 8 – low-pressure gas pipeline to the boilers

Удельная работа ДГА находится 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  $T_{\text{Г.ВХ}}$  – температура газа на входе в детандер, К;  $P_{\text{Г.ВХ}}, P_{\text{Г.ВЫХ}}$  – входное и выходное давления газа для детандера соответственно, Па;  $c'_p$  – изобарная объемная теплоемкость газа, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $k$  – показатель адиабаты;  $\eta_{\text{д}}$  – внутренний относительный КПД детандера;  $\eta_{\text{э.м}}$  – электромеханический КПД ДГА.

Для газопоршневого ДВС удельная полезная работа по выработке электроэнергии определяется:

$$l_{\text{ДВС}} = Q_{\text{н}}^p \cdot \eta_{\text{ДВС}}, \quad (2)$$

где  $Q_{\text{н}}^p$  – теплота сгорания топлива, Дж/м<sup>3</sup>;  $\eta_{\text{ДВС}}$  – КПД ДВС по выработке электроэнергии.

Проанализируем влияние температуры поступающей в двигатель топливной смеси на величину его коэффициента полезного действия. Начиная с определенной температуры (чаще всего это +25 °С), КПД ДВС начинает резко снижаться, а при превышении максимально допустимой температуры (чаще всего это +35 °С) ДВС должен отключаться. Для поддержания температуры топливной смеси ниже максимально допустимой температуры предусмотрено использование холодильной машины. Так как холодильная машина включается только при превышении температурой смеси максимально допустимой величины (которая для большинства марок ДГА составляет около 35 °С), при этом мощность, потребляемая холо-

дильной машиной существенно меньше выработки мощности ДГА, величиной работы холодильной машины можно пренебречь.

Снижение температуры топливной смеси за счет охлаждения газа в детандере можно вычислить по формуле

$$\Delta t_{\text{см}} = \frac{l_{\text{ДГА}}}{c'_p \cdot \eta_{\text{Э.М}}} \cdot \frac{\rho_{\text{Г}} \cdot c_{\text{Г}}}{\rho_{\text{Г}} \cdot c_{\text{Г}} + \overline{V}_{\text{ВОЗ}} \cdot \rho_{\text{ВОЗ}} \cdot c_{\text{ВОЗ}}}, \quad (3)$$

где  $\rho_{\text{Г}}, \rho_{\text{ВОЗ}}$  – плотности газа и воздуха при нормальных условиях,  $\text{кг/м}^3$ ;  $c_{\text{Г}}, c_{\text{ВОЗ}}$  – изобарные объемные теплоемкости газа и воздуха соответственно,  $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ ;  $\overline{V}_{\text{ВОЗ}}$  – отношение расхода воздуха к расходу газа,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ .

В летний период применение ДГА позволяет повысить КПД газопоршневого ДВС, при этом прирост мощности ДВС может в несколько раз превосходить вырабатываемую в ДГА мощность.

Для когенерационной котельной с ДВС прирост суммарной удельной работы от применения ДГА находится по формуле

$$\Delta l_{\Sigma} = l_{\text{ДГА}} + g \cdot \Delta l_{\text{ДВС}}, \quad (4)$$

где  $g$  – отношение расхода поступающего в двигатель внутреннего сгорания газа к общему расходу газа на котельную;  $\Delta l_{\text{ДВС}}$  – разница удельных работ ДВС для схемы с детандером и схемы с дросселированием,  $\text{Дж/м}^3$ .

Существенное влияние на прирост суммарной удельной работы оказывает величина доли газа, поступающего на ДВС. При сопоставимых значениях максимальной тепловой и электрической нагрузки эта доля будет близка к 1. В этом случае энергетический эффект определяется не только величиной работы детандера, но и приростом работы ДВС в летний период. При росте соотношения максимальной тепловой нагрузки к электрической данная доля будет уменьшаться. В дальнейшем рассмотрим котельные с долей  $g = 1$ , у которых весь газ поступает в ДВС, а выработка тепловой энергии происходит за счет использования тепла уходящих газов.

При равенстве значений суммарной вырабатываемой электрической мощности для схемы с ДГА и варианта с дросселированием выражение для определения экономии топлива от использования ДГА примет вид

$$\Delta G_{\Sigma} = G_{\Sigma}^{\text{ДР}} \cdot \frac{\Delta l_{\Sigma}}{l_{\text{ДГА}} + l_{\text{ДВС}}^{\text{ДГА}}}, \quad (5)$$

где  $G_{\Sigma}^{\text{ДР}}$  – суммарный расход газа для схемы с дросселированием,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $l_{\text{ДГА}}, l_{\text{ДВС}}^{\text{ДГА}}$  – удельные работы ДГА и ДВС для схемы с ДГА соответственно,  $\text{Дж/м}^3$ .

Из формулы (5) следует, что экономия топлива находится примерно в прямо пропорциональной зависимости от величины прироста суммарной

работы, так как величина работы ДВС изменяется незначительно, а работа ДГА существенно ниже работы ДВС. Таким образом, прирост суммарной удельной работы (4) в дальнейшем будем считать удельным критерием, характеризующим энергетический эффект от использования схем с детандером.

### Режимы работы схем с ДГА при низких температурах воздуха

При расширении газа в детандере происходит уменьшение давления газа и его охлаждение.

Для процесса расширения газа в детандере текущая температура газа связана с давлением следующей зависимостью

$$T_{\text{Г}} = T_{\text{Г.ВХ}} \cdot \left( 1 - \eta_{\text{Д}} \cdot \left( 1 - \left( \frac{P_{\text{Г}}}{P_{\text{Г.ВХ}}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right) \right), \quad (6)$$

где  $P_{\text{Г}}$  – текущее давление газа, Па.

При расчетах принято, что в детандере используется весь располагаемый перепад давлений, то есть давление газа уменьшается в процессе расширения от входного давления до давления, чуть большего, чем давление в двигателях внутреннего сгорания. Однако если выходная температура газа будет ниже точки росы, то после детандера будут образовываться кристаллогидраты, что может неблагоприятно сказаться на сроке службы газопровода.

Максимальное влагосодержание метана при данных температуре и давлении будет определяться по формуле

$$d_{\text{max}} = \frac{R_{\text{мет}}}{R_{\text{вод}}} \cdot \frac{P_{\text{п.нас}}(T)}{P_{\text{Г}}}, \quad (7)$$

где  $P_{\text{п.нас}}(T)$  – давление насыщения паров воды, Па;  $R_{\text{мет}}, R_{\text{вод}}$  – газовые постоянные метана и водяных паров соответственно,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

Для процесса расширения газа в детандере величина максимального влагосодержания будет уменьшаться с падением давления. Давление газа в детандере, при котором величина максимального влагосодержания становится равной значению начального влагосодержания, будет являться минимально допустимым давлением газа.

Для предотвращения образования кристаллогидратов после детандера устанавливается дросселирующее устройство, которое поддерживает давление газа на выходе из детандера равным или чуть большим минимально допустимого. В этом случае будет происходить снижение вырабатываемой ДГА мощности за счет уменьшения используемого в детандере перепада давлений.

Введем коэффициент использования работы детандера, который будет находиться по формуле

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

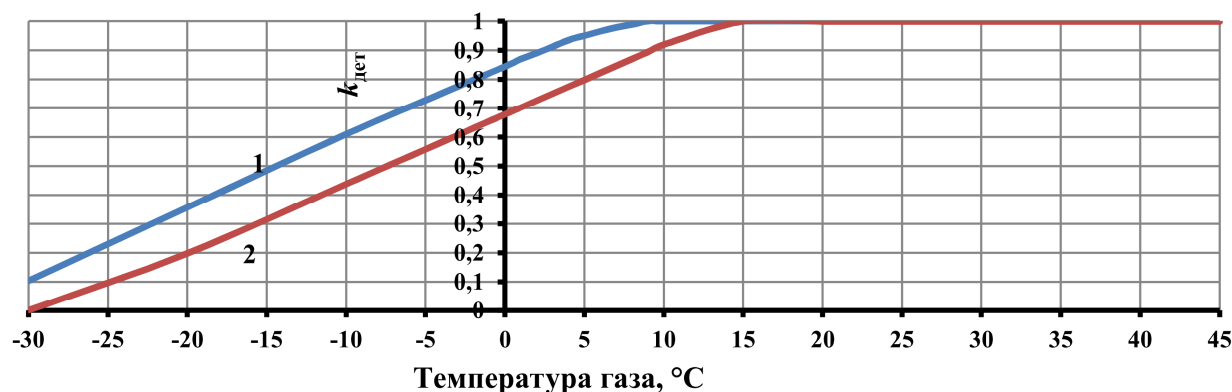


Рис. 3. Зависимость коэффициента использования работы детандера от температуры газа для  $P_{вх} = 7$  атм: 1 – для начального влагосодержания 40 мг/кг; 2 – для максимально допустимого начального влагосодержания 82 мг/кг

Fig. 3. Dependence of the expander operation use coefficient on the gas temperature for  $P_{вх} = 7$  atm: 1 – for the initial moisture content of 40 mg/kg; 2 – for the maximum permissible initial moisture content of 82 mg/kg

где  $l_{ДГА}^{действ}$  – удельная действительная работа ДГА, Дж/нм<sup>3</sup>;  $l_{ДГА}^{max}$  – максимальная удельная работа ДГА при использовании располагаемого перепада давлений, Дж/нм<sup>3</sup>.

Данный коэффициент показывает, какая часть от максимально возможной работы (то есть работы при полной реализации располагаемого перепада давлений природного газа в ДГА) может быть использована в ДГА при соблюдении условия недопущения образования кристаллогидратов в газопроводе после детандера.

Отраслевой стандарт (СТО Газпром 089-2010) устанавливает, что точка росы природного газа равна  $-10$  °C при давлении 3,92 МПа, что эквивалентно влагосодержанию газа примерно 82 мг/кг газа.

На рис. 3 представлены зависимости коэффициента использования работы детандера от температуры воздуха.

На коэффициент использования работы детандера оказывают влияние следующие факторы: начальная температура газа, влагосодержание, входное давление.

С ростом начальной температуры газа величина  $k_{дет}$  увеличивается, так как рост входной температуры сопровождается увеличением использованного в детандере перепада давлений. Чем выше начальное влагосодержание, тем ниже коэффициент использования работы детандера.

Для величин начального влагосодержания от 40 до 82 мг/кг коэффициент эффективности работы детандера изменяется от 0,67–0,85 (при температуре, близкой к 0 °C) до менее чем 0,1 (при  $-30$  °C). При отрицательных температурах наружного воздуха существенно падает энергетическая эффективность от использования схемы с детандером без подогрева. С ростом температуры газа коэффициент эффективности использования рабо-

ты детандера будет увеличиваться, пока не достигнет значения, равного 1. Более высокие температуры газа характеризуются отсутствием ограничений по выходному давлению газа.

Температура уходящих газов от ДВС составляет около 300–400 °C, что позволяет нагреть газ до температур, существенно превышающих минимально необходимую температуру. Для дальнейших расчетов примем температуру подогрева газа равной 100 °C.

Минимальная температура подогрева газа, при которой соблюдается условие недопущения образования кристаллогидратов и используется весь располагаемый перепад давления в детандере, находится по формуле (6), в которую вместо текущего давления газа подставляют давление в топливосжигающих агрегатах. Результаты расчетов показывают, что минимальная температура подогрева составит от 14 до 29 °C при давлении от 7 до 13 атм.

Таким образом, для схем с отсутствием подогрева газа в период низких температур воздуха для недопущения появления кристаллогидратов предложен режим с дросселированием газа после детандера до минимально допустимого давления, что снижает мощность ДГА. Применение схемы с подогревом при отрицательных температурах воздуха позволяет использовать полностью располагаемый перепад давления газа в детандере.

#### Режимы работы схем с ДГА при высоких температурах воздуха

Работа современных газопоршневых ДВС характеризуется снижением величины КПД по выработке электроэнергии при повышении температуры топливной смеси выше определенного оптимального значения. Температура топливной смеси для варианта с подогревом будет выше, чем при отсутствии подогрева, что может в летний

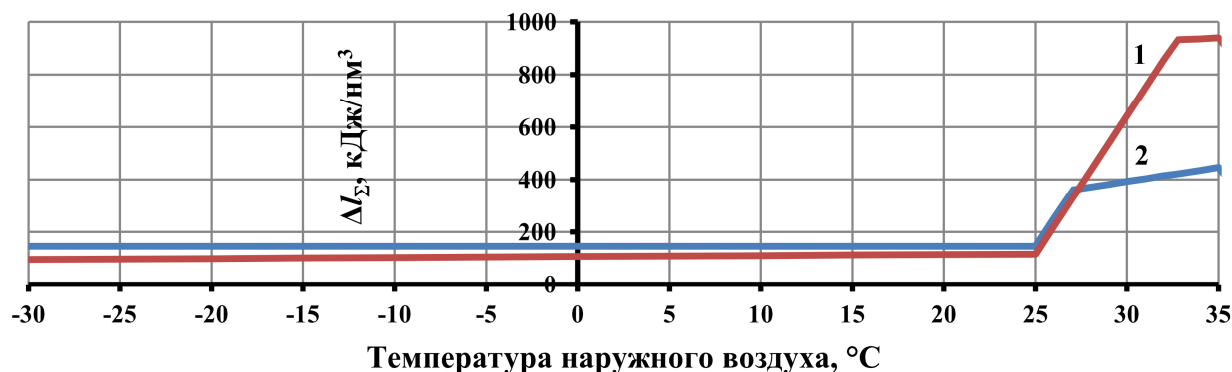


Рис. 4. Зависимость прироста суммарной удельной работы от температуры газа для схем с ДГА при  $P_{вх} = 7$  атм: 1 – без предварительного подогрева; 2 – с предварительным подогревом  
Fig. 4. Dependence of the increase in total specific work on the gas temperature for schemes with EGU at  $P_{вх} = 7$  atm: 1 – without preheating; 2 – with preheating

период привести к снижению КПД ДВС. Дальнейшее увеличение температуры наружного воздуха уменьшит разницу полезных работ детандера для схем с подогревом и без него, при этом для схемы без подогрева удельная работа ДВС будет выше.

При определенном значении температуры наружного воздуха значения прироста суммарной полезной работы для схем с подогревателем и без предварительного подогрева станут равны. Если температура наружного воздуха превысит данное значение, для схемы с подогревателем необходимо предусмотреть режим с отключением подогрева газа для поддержания максимального значения прироста суммарной удельной работы.

Проведем анализ предложенного режима на примере ДВС марки Caterpillar электрической мощностью 1 МВт. КПД ДВС линейно падает от 38 до 36 % при повышении температуры смеси от 25 до 35 °C.

На рис. 4 представлены зависимости прироста удельной суммарной работы от температуры воздуха для разных схем с ДГА.

Результаты расчета свидетельствуют, что при входном давлении газа 7 атм до температуры газа 25 °C схема с подогревом обладает преимуществом, так как в этот период прирост удельной работы определяется только работой детандера, которая всегда выше при наличии предварительного подогрева.

При более высоких температурах воздуха схема с ДГА без подогрева поддерживает температуру смеси в оптимальном диапазоне, что дает возможность получить существенный дополнительный прирост энергетического эффекта за счет высокого КПД ДВС. Для схемы с подогревом газа КПД ДВС будет уменьшаться, поэтому при температуре свыше 27 °C подогрев желательно отключить.

### Расчет энергетической эффективности различных схем применения ДГА

Проведем расчет годовой экономии топлива от применения схем с ДГА с подогревом и без подогрева. В качестве объекта выберем когенерационную котельную с 3 ДВС марки Caterpillar электрической мощностью по 1 МВт при давлении поступающего в котельную газа 7 атм. Весь поступивший на котельную газ подается в ДВС ( $g = 1$ ). Для расчетов выбраны климатические данные для Липецкой области за 2021 год.

Для всех месяцев, кроме летних, для расчетов принята среднемесячная температура воздуха. В летний период учтено количество дней с температурой, превышающей температуру отключения подогрева для схемы с ДГА.

На рис. 5 представлена ожидаемая месячная экономия топлива.

Наибольшая разница среднемесячной экономии топлива от использования подогрева наблюдается зимой, так как для схемы без подогрева в детандере используется только часть располагаемого перепада давлений. В летний период за счет отключения в отдельные дни подогрева газа схема с подогревом работает как схема без подогрева, что снижает разницу между этими двумя схемами. Применение предварительного подогрева газа до 100 °C при реализации оптимального летнего режима позволяет увеличить годовую экономию топлива примерно в 1,4 раза по сравнению с использованием схемы с детандером без подогрева.

Таким образом, наибольшая экономия топлива достигается при использовании схемы с предварительным подогревом газа перед детандером, так как данная схема позволяет снять ограничения по недопущению выпадения кристаллогидратов в период низких температур наружного воздуха, при этом работа детандера при подогреве всегда выше, чем при отсутствии подогрева. Для данной схемы оптимальный режим работы заключается в отклю-



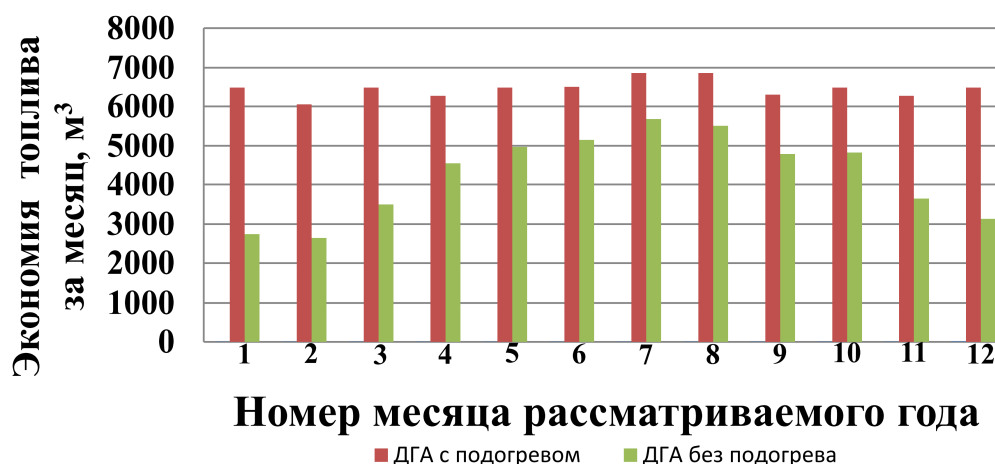


Рис. 5. Ожидаемая среднемесячная экономия топлива для схемы с детандером без подогрева и схемы с детандером и предварительным подогревом  
Fig. 5. Expected average monthly fuel economy for a circuit with an expander without heating and a circuit with an expander and preheating

чении подогрева в летнее время при равенстве или превышении приращения суммарной удельной работы для схемы без подогрева по сравнению со схемой с подогревом.

#### Выводы

В статье рассмотрены режимы работы схем применения ДГА на когенерационных котельных с газопоршневыми ДВС. Показано, что в имеющихся по данной тематике работах не учтены ограничения, накладываемые условием недопущения выпадения кристаллогидратов после детандера. Показано, что при низких температурах воздуха работа детандера может существенно уменьшиться из-за данных ограничений. Выявлено, что даже незначительный подогрев газа (до величины 29 °C) позволяет реализовать располагаемый перепад давлений газа в детандере. Дополнительным преимуществом предварительного подогрева газа является повышение работы детандера. В летний период подогрев газа перед детандером может понизить коэффициент полезного действия двигателей внутреннего сгорания по сравнению со схемой с детандером без подогрева. Показано, что при

определенном значении температуры наружного воздуха прироста суммарной полезной работы для схем с подогревателем и без предварительного подогрева сравниваются по величине. Предложено при превышении температурой наружного воздуха данного значения предусмотреть отключение подогрева газа. Проведен расчет годовой и среднемесячной экономии топлива от применения различных схем применения ДГА для когенерационной котельной с 3 двигателями внутреннего сгорания. Наибольшая разница среднемесячной экономии топлива от использования подогрева наблюдается зимой, так как для схемы без подогрева в детандере используется только часть располагаемого перепада давлений из условия недопущения образования кристаллогидратов. В летний период за счет отключения в отдельные дни подогрева газа схема с подогревом работает как схема без подогрева, что снижает разницу между этими двумя схемами. Применение предварительного подогрева газа до 100 °C при реализации оптимального летнего режима позволяет увеличить годовую экономию топлива примерно в 1,4 раза по сравнению с использованием схемы с детандером без подогрева.

#### Список литературы

1. Филипов С.П., Дильман М.Д. Перспективы использования когенерационных установок при реконструкции котельных // Промышленная энергетика. 2014. № 4. С. 7–11.
2. Liu M., Shi Y., Fang F. Combined cooling heating and power systems: A survey renewable sustain // Energy Rev., 2014. Vol. 35. P. 1–2. DOI: 10.1016/j.rser.2014.03.054
3. Mehdi T.J., Hasan R., Hossein A.A. Modeling turbo-expander systems // Simulation. 2013. Vol. 89, no. 2. P. 234–248.
4. Zamfirescu C., Dincer I. Performance investigation of high-temperature heat pumps with various BZT working fluids // Thermochemica Acta. 2009. Vol. 488, iss. 1–2. P. 66–67. DOI: 10.1016/j.tca.2009.01.028
5. Cinella P., Hercus S. Robust optimization of dense gas flows under untertrain operating conditions // Computers & Fluids. 2010. Vol. 39, iss. 10. P. 1893–1908. DOI: 10.1016/j.compfluid.2010.06.020
6. Congedo P., Cinella P., Corre C. Shape optimization for dense gas flows in turbine cascades // Proceedings of ICCFD 4. 2006. P. 555–560. DOI: 10.1007/978-3-540-92779-2\_87



7. Мальханов О.В. К вопросу об энергосберегающей турбодетандерной установки на ГРС // Энергосбережение и водоподготовка. 2007. № 5. С. 27–28.
8. Quoilin S., Lemort V., Lebrun J. Experimental study and modeling of an Organic Rankine Cycle using scroll expander // *Applied Energy*. 2010. Vol. 87 (4). P. 1260–1268. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.06.026
9. 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. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2009.04.013
10. Herron T., Peterson 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. DOI: 10.1243/09576509jpe546
11. 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. No. 19. P. 1–7. DOI: 10.1088/0960-1317/19/9/094009
12. Стребков А.С., Жавроцкий С.В. Оценка эффективности производства электрической энергии при использовании силового потенциала топливного газа // *Вестник Брянского государственного университета*. 2013. № 4 (40). С. 77–86.
13. Жигулина Е.В., Калинин Н.В., Хромченков В.Г. Эффективность подогрева природного газа при использовании детандер-генераторных агрегатов на тепловых электрических станциях // *Новости теплоснабжения*. 2010. № 2. С. 34–37.
14. Корягин А.В., Соловьев Р.В. Установка детандер-генераторных агрегатов на ТЭЦ промышленных предприятий // *Энергосбережение и водоподготовка*. 2009. № 5. С. 34–35.
15. Клименко А.В., Агабабов В.С., Борисова П.Н. Возможность производства холода и дополнительной электроэнергии на тепловой электростанции // *Теплоэнергетика*. 2017. № 6. С. 30–37. DOI: 10.1134/S0040363617060017
16. Агабабов В.С. К вопросу анализа эффективности использования турбодетандеров в схемах тепловых электростанций // *Энергосбережение и водоподготовка*. 2017. № 2 (106). С. 71–73.
17. Клименко А.В., Агабабов В.С., Борисова П.Н., Петин С.Н. Термодинамическая эффективность использования детандер-генераторных агрегатов на станциях технологического уменьшения давления транспортируемого природного газа // *Теплофизика и аэромеханика*. 2017. Т. 24, № 6. С. 961–968.
18. Оценка энергетической эффективности применения детандер-генераторных агрегатов в системах с комбинированным производством тепла и электроэнергии / В.Я. Губарев, А.Г. Арзамасцев, А.И. Шарапов, А.Ю. Картель // *Проблемы региональной энергетики*. 2018. № 3 (38). С. 93–101.
19. 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. 20–27. DOI: 10.23859/1994-0637-2018-1-82-2
20. Quantification of thermodynamic uncertainties in real gas flows / L. Parussini, L. Pediroda, P. Congedo, P. Cinella // *Int. J. Eng. Syst. Model Simul*. 2010. Vol. 2, no. 1-2. P. 12–24. DOI: 10.1504/ijesms.2010.031867

## References

1. Filipov S.P., Dilman M.D. [Prospects for the use of cogeneration plants in the reconstruction of boiler houses]. *Industrial power engineering*. 2014;(4):7–11. (In Russ)
2. Liu M., Shi Y., Fang F. Combined cooling heating and power systems: A survey renewable sustain. *Energy Rev*. 2014;35:1–2. DOI: 10.1016/j.rser.2014.03.054
3. Mehdi T.J., Hasan R., Hossein A.A. Modeling turbo-expander systems. *Simulation*. 2013;89(2):234–248.
4. Zamfirescu C., Dincer I. Performance Investigation of high-temperature heat pumps with Various BZT working fluids. *Thermochimica Acta*. 2009;488(1–2):66–67. DOI: 10.1016/j.tca.2009.01.028
5. Cinella P., Hercus S. Robust optimization of dense gas flows under untertrain operating conditions. *Computers & Fluids*. 2010;39(10):1893–1908. DOI: 10.1016/j.compfluid.2010.06.020
6. Congedo P., Cinella P., Corre C. Shape optimization for dense gas flows in turbine cascades. In: *Proceedings of ICCFD 4*. 2006. P. 555–560. DOI: 10.1007/978-3-540-92779-2\_87
7. Malkhanov O.V. [On the issue of an energy-saving turbo-expander unit at the GDS]. *Energysaving and watertreatment*. 2007;5:27–28. (In Russ)
8. Quoilin S., Lemort V., Lebrun J. Experimental study and modeling of an Organic Rankine Cycle using scroll expander. *Applied Energy*. 2010;87(4):1260–1268. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.06.026
9. Lemort V., Quoilin S., Cuevas C., Lebrun J. Testing and modeling a scroll expander integrated into an Organic Rankine Cycle. *Applied Thermal Engineering*. 2009;29:3094–3102. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2009.04.013
10. Herron T., Peterson 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;222:271–282. DOI: 10.1243/09576509jpe546

11. Krähenbühl D., Zwyssig C., Weser H., Kolar J. W. Theoretical and experimental results of a mesoscale electric power generation system from pressurized gas flow. *IOP Publishing, Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2009;19:1–7. DOI: 10.1088/0960-1317/19/9/094009
12. Strebkov A.S., Zhavrotskiy S.V. Assessment of electric energy production efficiency when using power potential of fuel gas. *The Bryansk state university herald*. 2013;4(40):77–86. (In Russ)
13. Zhigulina E.V., Kalinin N.V., Khromchenkov V.G. [The efficiency of natural gas heating when using expander-generator units at thermal power plants]. *Novosti teplosnabzheniya* [News of heat supply]. 2010;2:34–37. (In Russ)
14. Koryagin A.V., Solovyov R.V. [Installation of expander-generator units at thermal power plants of industrial enterprises]. *Energysaving and watertreatment*. 2009; 5:34–35. (In Russ)
15. Klimenko A.V., Agababov V.S., Borisova P.N. On the possibility of generation of cold and additional electric energy at thermal power stations. *Thermal Engineering*. 2017;64(6):422–428. DOI: 10.1134/S0040601517060015
16. Agababov V.S. To the problems of analysis of the efficiency of expansion turbines in the schemes of thermal power plants. *Energysaving and watertreatment*. 2017;2(106):71–73. (In Russ)
17. Klimenko A.V., Agababov V.S., Borisova P.N., Petin S.N. Thermodynamic efficiency of expander-generator units at the plants for technological decompression of transported natural gas. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2017;24(6):933–940. DOI: 10.1134/S0869864317060129
18. Gubarev V.Ya., Arzamastsev A.G., Sharapov A.I., Kartel A.Yu. [Evaluation of the energy efficiency of the use of expander-generator units in systems of combined heat and power production]. *Problems of the Regional Energetics*. 2018;3(38):93–101. (In Russ).
19. Gubarev V.Ya., Arzamastsev A.G., Kartel A.Yu. Research into the application of expander-generator sets on cogeneration boilers with internal combustion engines. *Cherepovets state university bulletin*. 2018;1(82):20–27. (In Russ) DOI: 10.23859/1994-0637-2018-1-82-2
20. Parussini L., Pediroda L., Congedo P., Cinella P. Quantification of thermodynamic uncertainties in real gas flows. *Int. J. Eng. Syst. Model Simul*. 2010;2(1-2):12–24. DOI: 10.1504/ijesms.2010.031867

#### **Информация об авторах**

**Губарев Василий Яковлевич**, канд. техн. наук, проф., заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики, Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия; gv\_lipetsk@rambler.ru.

**Арзамасцев Алексей Геннадьевич**, канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры промышленной теплоэнергетики, Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия; arzamastsev-ag@mail.ru.

**Картель Александр Юрьевич**, канд. техн. наук, доц. кафедры промышленной теплоэнергетики, Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия; zetzervam@gmail.com.

#### **Information about the authors**

**Vasiliy Ya. Gubarev**, Cand. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Industrial Heat Power Engineering, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia; gv\_lipetsk@rambler.ru.

**Aleksey G. Arzamastsev**, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Ass. Prof. of the Department of Industrial Heat Power Engineering, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia; arzamastsev-ag@mail.ru.

**Aleksandr Yu. Kartel**, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Industrial Heat Power Engineering, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia; zetzervam@gmail.com.

*Статья поступила в редакцию 15.09.2022; одобрена после рецензирования 10.11.2022; принята к публикации 10.11.2022.*

*The article was submitted 15.09.2022; approved after review 10.11.2022.; accepted for publication 10.11.2022.*