

## Energy Efficiency Assessment of the Use of Expander-Generator Set in Cogeneration Systems

Gubarev V. Ia., Arzamastsev A. G., Sharapov A. I., Kartel A. Iu.  
Lipetsk State Technical University  
Lipetsk, Russian Federation

**Abstract.** The purpose of the article is to assess energy efficiency of the expander generator application in cogeneration systems. It demonstrates that the research works devoted to this subject do not take into account the effect that gas parameters after the expander have on operating efficiency of the main power generating equipment that leads to a distortion of the assessment of expander energy efficiency. The energy efficiency is determined by specific fuel savings resulting from the use of a circuit with an expander compared to the option of gas throttling. It shows that specific fuel saving is directly proportional to the increment value of the total specific useful work of the utility company when using expander generators. It was found that when using the expander at the cogeneration plant the total specific useful work increment is less than the specific work of the expander generator. It is shown that the energy effect magnitude from the use of circuits with an expander at cogeneration boilers depends on the ambient air temperature. For an expander at cogeneration boiler houses with gas piston internal combustion engines at air temperatures below the optimum mixture temperature, the total increment of the specific work is equal to the specific work of the expander, at higher temperatures, the increment of the total specific work can be several times greater than the specific work of the expander. The prospects of preheating gas before the expander at the considered utility companies were analyzed.

**Keywords:** expander-generator set, cogeneration boiler house, specific fuel economy.

**DOI:** 10.5281/zenodo.2222376

**Estimarea eficienței energetice a utilizării agregatelor expander-generator în sistemele de cogenerare**

Gubarev V.YA., Arzamastsev A.G., Sharapov A.I., Karteli A.Yu.

Universitatea de Stat din Lipetsk  
Lipetsk, Federația Rusă

**Rezumat.** Scopul acestui articol este de a evalua efectul energetic urmare a utilizării agregatelor expandar-generator în sistemele cu cogenerare a energiei, luând în considerare efectul răcirii gazelor la ieșirea din expander. Efectul energetic este determinat de economiile specifice de combustibil datorate utilizării unui expander în comparație cu opțiunea de limitare a presiunii gazului (gas throttling) cu programare a producerii energiei termice și energiei electrice. Economia de combustibil este direct proporțională cu creșterea sumară a indicatorului specific de producere a energiei la utilizarea agregatelor expander-generator. S-a constatat, că valoarea indicatorului specific total al lucrului util al ciclului turbinei cu abur este mai mică în comparație cu varianta utilizării agregatului expander-generator din cauza efectului negativ de răcire a gazelor la micșorarea presiunii lor. La utilizarea expanderului la alimentarea centralelor cu cogenerare cu motoare de gaze cu piston la temperatura aerului sub valoarea optimă a amestecului pentru acest tip de motor, creșterea totală a lucrului util este determinată numai de funcționarea expanderului. La temperaturi mai ridicate ale aerului, creșterea lucrului specific util total depășește de ori lucrul expanderului, datorită efectului pozitiv de scădere a temperaturii amestecului de combustibil asupra eficienței motoarelor cu combustie internă. O eficiență relativă mai mare se obține prin utilizarea unităților de generare a expandoarelor în centralele termice cu cogenerare, comparativ cu centralele termoelectrice. Există perspective de aplicare a gazului preîncălzit în amont-ul expanderului pentru sporirea eficienței surselor de generare. Rezultatele obținute indică la posibilitatea evaluării utilizării unităților de expandar-generator la diferite centrale electrice după criteriul sporirii eficienței energetice.

**Cuvinte-cheie:** agregat expander-generator, centrala de cogenerare, economie specifică de combustibil.

**Оценка энергетической эффективности применения**

**детандер-генераторных агрегатов в системах с комбинированным производством тепла и электрической энергии**

Губарев В.Я., Арзамасцев А.Г., Шаратов А.И., Картель А.Ю.

Липецкий государственный технический университет  
Липецк, Российская Федерация

**Аннотация.** Целью данной статьи является оценка энергетического эффекта от применения детандер-генераторных агрегатов в системах с комбинированным производством тепла и электрической энергии.

© Губарев В.Я., Арзамасцев А.Г.,  
Шаратов А.И., Картель А.Ю., 2018

Показано, что посвященные этой теме исследования не учитывают влияния параметров газа на выходе из детандера на эффективность работы основного энергопроизводящего оборудования или рассматривают схемы с применением детандера и подогрева, что в обоих случаях ведет к искажению оценки энергетического эффекта от применения детандера. Энергетический эффект определяется удельной экономией топлива от применения схемы с детандером по сравнению с вариантом с дросселированием газа при неизменных графиках выработки тепла и электрической энергии. Показано, что удельная экономия топлива прямо пропорциональна величине приращения суммарной удельной полезной работы энергетического предприятия при применении детандер-генераторных агрегатов. При анализе эффективности применения детандера на теплоэлектроцентралях выявлено, что из-за неблагоприятного влияния охлаждения газа в детандере на эффективность работы паротурбинного цикла приращение суммарной удельной полезной работы меньше удельной работы детандер-генераторного агрегата. При использовании детандера на когенерационных котельных с газопоршневыми двигателями внутреннего сгорания при температурах воздуха ниже оптимальной температуры смеси для данного типа двигателей суммарное приращение работы определяется только работой детандера. При более высоких температурах воздуха приращение суммарной удельной работы может в несколько раз превысить работу детандера за счет положительного влияния снижения температуры топливной смеси на эффективность работы двигателей внутреннего сгорания. Выявлено, что большую относительную эффективность дает применения детандер-генераторных агрегатов на когенерационных котельных по сравнению с теплоэлектроцентралями и проанализированы перспективы применения подогрева газа перед детандером на рассматриваемых энергетических предприятиях. Сделан вывод о возможности использования оценки энергетического эффекта от применения детандер-генераторных агрегатов на различных энергетических предприятиях по величине приращения суммарной удельной полезной работы.

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

### Введение

В настоящее время существенную долю в топливно-энергетическом балансе Российской Федерации и развитых стран составляет природный газ. Одним из наиболее эффективных способов использования природного топлива является комбинированное производство тепла и электрической энергии. Повышение эффективности использования энергии природного газа на энергетических предприятиях с комбинированной выработкой тепла и электроэнергии позволяет снизить величину потребляемого топлива при сохранении неизменными графиков выработки тепла и электроэнергии.

Одним из решений данной проблемы является использование перед топливосжигающим оборудованием детандер-генераторных агрегатов (ДГА), позволяющее осуществлять выработку электроэнергии за счет использования потенциальной энергии избыточного давления [1-10]. Аспектам использования ДГА на промышленных предприятиях посвящен ряд работ зарубежных и отечественных ученых [11-18]. Отмечено, что применение подогрева газа перед детандером позволяет увеличить удельную полезную работу ДГА и повысить температуру газа после детандера [16-18]. В силу этого большинство работ рассматривает вариант с использованием предварительного подогрева газа как основной вариант применения ДГА. Недостатком

данных работ по применению ДГА является отсутствие критерия, определяющего влияние использования собственно ДГА на суммарную выработку электроэнергии, так как рассматривается эффективность от комбинированного применения ДГА и подогревателей газа. В этом случае учитывается суммарный эффект использованной в детандере потенциальной энергии давления природного газа и физической теплоты внутренних энергоресурсов, передаваемой газу при подогреве, что приводит к завышению эффекта от применения детандера. Для анализа применения ДГА необходимо оценить энергоэффективность от использования собственно детандера, что возможно только при сравнении друг с другом схем с ДГА и дросселированием без применения подогрева газа.

В работах, рассматривающих использование ДГА без предварительного подогрева газа, отсутствует методика оценки энергетического эффекта, учитывающая влияние параметров газа после детандера на эффективность основного энергопроизводящего оборудования. Анализ применения ДГА должен осуществляться с учетом комплексного подхода, то есть учитывать не только выработку энергии в ДГА, но и влияние снижения температуры газа после ДГА на энергоэффективность в расположенном после детандера энергетическом оборудовании.

Для паротурбинного цикла ТЭЦ применение ДГА влечет за собой уменьшение удельной полезной работ паротурбинного цикла, в то время как уменьшение температуры газа перед двигателями внутреннего сгорания (ДВС) в когенерационных котельных в период высоких температур наружного воздуха повышает коэффициент полезного действия ДВС по выработке электроэнергии.

Таким образом, в настоящее время в работах зарубежных и российских ученых [1-18], посвященных тематике применения схем с ДГА без подогрева на энергетических предприятиях, отсутствует оценка влияния параметров газа после детандера на эффективность работы основного энергопроизводящего оборудования, что не позволяет точно оценить комплексный энергетический эффект от применения ДГА. Целью данной статьи является оценка энергетического эффекта от применения ДГА на энергетических предприятиях с комбинированным производством тепла и электроэнергии.

### МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДЕТАНДЕР-ГЕНЕРАТОРНЫХ АГРЕГАТОВ

Для оценки влияния ДГА на энергоэффективность предприятия схема с применением детандера сравнивается с традиционным вариантом использования энергии газа, при котором поступающий на предприятие газ дросселируется перед топливосжигающим оборудованием.

Для схемы с дросселированием суммарная электрическая мощность равна мощности основного энергопроизводящего оборудования:

$$N_{\Sigma} = N_{m.eq.}^{thrl.} \quad (1)$$

где  $N_{\Sigma}$ ,  $N_{m.eq.}^{thrl.}$  – суммарная электрическая мощность и мощность основного оборудования для варианта с дросселированием, Вт.

Суммарная удельная полезная работа для данной схемы равна удельной полезной работе основного оборудования и находится как:

$$l_{\Sigma}^{thrl.} = l_{m.eq.}^{thrl.} = \frac{N_{\Sigma}}{G_{thrl.}} \quad (2)$$

где  $l_{\Sigma}^{thrl.}$ ,  $l_{m.eq.}^{thrl.}$  – суммарная удельная полезная работа и удельная полезная работа основ-

ного оборудования соответственно для варианта с дросселированием, Дж/н.м<sup>3</sup>,  $G_{thrl.}$  – расход газа для схемы с дросселированием, н.м<sup>3</sup>/с.

Для схемы с ДГА суммарная электрическая мощность складывается из мощности основного оборудования и мощности ДГА:

$$N_{\Sigma}^{ex.gen.} = N_{m.eq.}^{ex.gen.} + N_{ex.gen.} \quad (3)$$

где  $N_{\Sigma}^{ex.gen.}$ ,  $N_{m.eq.}^{ex.gen.}$  – суммарная электрическая мощность и мощность основного оборудования соответственно для варианта с использованием ДГА, Вт;  $N_{ex.gen.}$  – электрическая мощность ДГА, Вт.

Тогда суммарная удельная полезная работа схем с ДГА будет складываться из удельной полезной работы основного оборудования и удельной работы ДГА:

$$l_{\Sigma}^{ex.gen.} = l_{m.eq.}^{ex.gen.} + l_{ex.gen.} = \frac{N_{m.eq.}^{ex.gen.}}{G_{ex.gen.}} + \frac{N_{ex.gen.}}{G_{ex.gen.}} \quad (4)$$

где  $l_{\Sigma}^{ex.gen.}$ ,  $l_{m.eq.}^{ex.gen.}$  – суммарная удельная полезная работа и удельная полезная работа основного оборудования для варианта с использованием ДГА, Дж/н.м<sup>3</sup>;  $l_{ex.gen.}$  – удельная полезная работа ДГА, Дж/н.м<sup>3</sup>;  $G_{ex.gen.}$  – расход газа для схемы с ДГА, н.м<sup>3</sup>/с.

Для паротурбинных ТЭЦ энергетический эффект от применения ДГА может заключаться как в приращении мощности при одинаковых расходах газа для сравниваемых схем, так и в экономии топлива при неизменных графиках выработки тепла и электрической мощности. Для когенерационных котельных с газопоршневыми двигателями внутреннего сгорания (по сути, мини-ТЭЦ) актуальным является экономия топлива при неизменных графиках выработки тепла и электроэнергии.

В дальнейшем рассмотрим энергетический эффект от применения ДГА как экономии топлива при неизменных графиках выработки электрической мощности и тепловой энергии.

Для схемы с постоянной суммарной электрической мощностью энергетический эффект от применения ДГА заключается в экономии топлива, которое находится как:

$$\Delta G = G_{\text{thrl.}} - G_{\text{ex.gen.}} = \frac{N_{\Sigma}^{\text{thrl.}}}{l_{\Sigma}^{\text{thrl.}}} - \frac{N_{\Sigma}^{\text{ex.gen.}}}{l_{\Sigma}^{\text{ex.gen.}}} \quad (5)$$

С учетом (2) и (4), уравнение (5) примет вид:

$$\Delta G = G_{\text{thrl.}} \cdot \frac{\Delta l_{\Sigma}}{l_{\Sigma}^{\text{ex.gen.}}} \quad (6)$$

где  $\Delta l_{\Sigma} = l_{\Sigma} - l_{\Sigma}^{\text{thrl.}}$  – приращение удельной полезной работы схемы с ДГА по сравнению с вариантом с дросселированием, Дж/н.м<sup>3</sup>.

Учитывая выражение (6), удельная экономия топлива (экономия топлива, отнесенная к расходу топлива при применении схемы с дросселированием), будет определяться по формуле:

$$\Delta g = \frac{\Delta G}{G_{\text{thrl.}}} = \frac{\Delta l_{\Sigma}}{l_{\Sigma}^{\text{ex.gen.}}} \quad (7)$$

Так как суммарная удельная полезная работа при применении ДГА меняется не более чем на 10%, можно в первом приближении принять удельный энергетический эффект от использования детандера прямо пропорциональным величине приращения суммарной удельной полезной работы.

### ПРИМЕНЕНИЕ ДЕТАНДЕР-ГЕНЕРАТОРНЫХ АГРЕГАТОВ НА ТЭЦ

Рассмотрим эффективность применения ДГА на энергетических предприятиях с комбинированным производством тепла и электрической энергии. При содержании метана в природном газе свыше 98% можно принимать при расчетах природный газ как чистый метан. Анализ экспериментальных работ по параметрам состояния углеводородов позволяет сделать вывод о допустимости расчета параметров состояния метана по зависимостям для идеального газа [19-20]. Расчет расширения газа в детандере будем вести по формулам для идеального газа, при этом природный газ будем рассматривать как метан. Температура поступающего на предприятие газа принимается равной температуре наружного воздуха.

Удельная полезная работа ДГА равна:

$$l_{\text{ex.gen.}} = c'_p \cdot T_0 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{P_{\text{exit}}}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \cdot \eta_{\text{ex.}} \cdot \eta_{\text{EM.}} \quad (8)$$

где  $c'_p$  – изобарная объемная теплоемкость газа, Дж/(н.м<sup>3</sup>·К);  $T_0$  – температура поступающего в детандер газа, К;  $P_0, P_{\text{exit}}$  – давления газа на входе в детандер и выходе из него соответственно, Па;  $k$  – показатель адиабаты;  $\eta_{\text{ex.}}, \eta_{\text{EM.}}$  – внутренний относительный к.п.д. детандера и электромеханический к.п.д. ДГА соответственно.

Особенностью применения ДГА на ТЭЦ является влияние процесса расширения газа в детандере на эффективность работы паротурбинного цикла, заключающееся в снижении физической теплоты топлива на входе в котел.

Удельная полезная работа паротурбинного цикла:

$$l_{\text{st.turb.}} = Q \cdot \eta_{\text{st.turb.}} \quad (9)$$

где  $l_{\text{st.turb.}}$  – удельная полезная работа цикла ПТУ, Дж/н.м<sup>3</sup>;  $Q$  – низшая теплота сгорания природного газа, Дж/н.м<sup>3</sup>;  $\eta_{\text{st.turb.}}$  – абсолютный электрический к.п.д. паротурбинного цикла.

При использовании детандера приращение удельной полезной работы паротурбинного цикла будет находиться по формуле:

$$\Delta l_{\text{st.turb.}} = - \frac{l_{\text{ex.gen.}}}{\eta_{\text{EM.}}} \cdot \eta_{\text{st.turb.}} \quad (10)$$

Суммарное приращение удельной полезной работы будет находиться как:

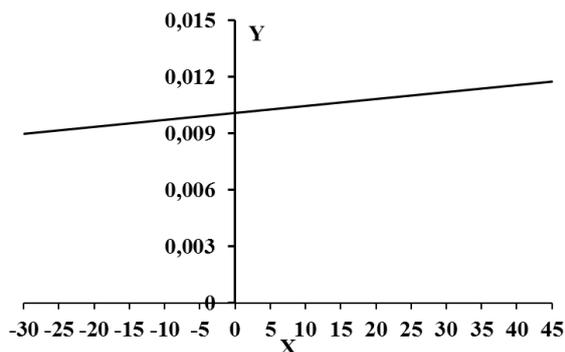
$$\Delta l_{\Sigma} = l_{\text{ex.gen.}} + \Delta l_{\text{st.turb.}} = l_{\text{ex.gen.}} \cdot \left( 1 - \frac{\eta_{\text{st.turb.}}}{\eta_{\text{EM.}}} \right) \quad (11)$$

Приращение суммарной удельной работы при применении ДГА на ТЭЦ будет ниже удельной полезной работы детандера из-за отрицательного влияния охлаждения газа на эффективность работы паротурбинного цикла.

Определим удельную экономию топлива от применения ДГА на ТЭЦ. Расчеты проводились для величины входного абсолютного

давления газа 7 бар, давление газа на выходе из детандера принято равным 1,2 бар. Величина внутреннего относительного к.п.д. детандера принята равной 75% [21], значение электромеханического к.п.д. ДГА - 95% [21], значение к.п.д. паротурбинного цикла - 0,3 [16].

На рисунке 1 представлена зависимость удельной экономии топлива от температуры наружного воздуха при применении ДГА на ТЭЦ.



X – температура наружного воздуха, °C; Y – удельная экономия топлива, н.м³/н.м³.

**Рис.1. Зависимость величины удельной экономии топлива от температуры наружного воздуха при применении ДГА на ТЭЦ.<sup>1</sup>**

Приведенные выше расчеты показывают, что удельная экономия топлива с ростом температуры воздуха будет увеличиваться за счет повышения величины удельной работы ДГА.

### ПРИМЕНЕНИЕ ДЕТАНДЕР-ГЕНЕРАТОРНЫХ АГРЕГАТОВ НА КОГЕНЕРАЦИОННЫХ КОТЕЛЬНЫХ

В настоящее время при строительстве котельных приоритетом обладают когенерационные котельные, отличающиеся от чисто отопительных возможностью выработки как тепла, так и электроэнергии. В основном на таких котельных используются для выработки электроэнергии двигатели внутреннего сгорания (ДВС) [22-23].

При рассмотрении эффективности использования ДГА на когенерационных котельных с ДВС принимается, что весь поступающий в котельную газ сначала проходит через детандер, а затем поступает в ДВС.

Характерной особенностью работы газопоршневых ДВС является зависимость к.п.д. от температуры топливной смеси на входе в двигатель. При температурах воздуха меньше минимально допустимой требуется предварительный подогрев смеси или ее компонентов до требуемой минимальной температуры, который осуществляется внутренними энергоресурсами котельной, что позволяет не учитывать тепло на подогрев газа при расчете энергетического эффекта. В диапазоне температур смеси от минимально допустимой до оптимальной величина к.п.д. ДВС остается приблизительно постоянной. При температурах смеси от оптимальной до максимально допустимой к.п.д. ДВС уменьшается с ростом температуры смеси. Эксплуатация двигателя при температуре смеси выше максимально допустимой запрещена производителем, поэтому для обеспечения функционирования двигателя в данном температурном диапазоне в большинстве случаев предусматривается охлаждение топливной смеси в парокompрессионной холодильной машине. В этом случае при оценке энергетического эффекта необходимо учитывать затраты электроэнергии на охлаждение топливной смеси.

Температура топливной смеси для варианта с дросселированием равна температуре наружного воздуха:

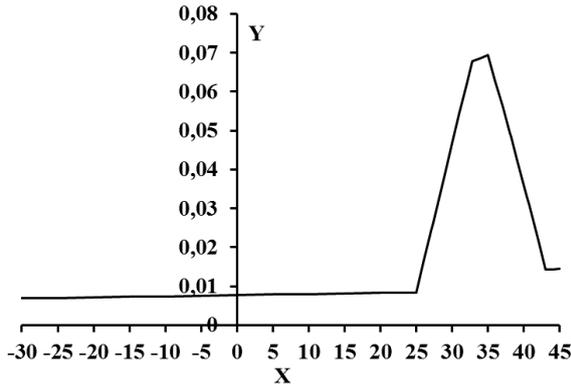
$$t_{\text{mix}}^{\text{thrld.}} = t_{\text{air}} \quad (12)$$

где  $t_{\text{mix}}^{\text{thrld.}}$ ,  $t_{\text{air}}$  – температуры топливной смеси для схемы с дросселированием и температура наружного воздуха соответственно, °C.

Температура топливной смеси для схемы с использованием ДГА находится по формуле:

$$t_{\text{mix}}^{\text{ex.gen.}} = \frac{\rho_{\text{gas}} \cdot c_{\text{gas}} \cdot t_{\text{gas}} + \bar{V}_{\text{air}} \cdot \rho_{\text{air}} \cdot c_{\text{air}} \cdot t_{\text{air}}}{\rho_{\text{gas}} \cdot c_{\text{gas}} + \bar{V}_{\text{air}} \cdot \rho_{\text{air}} \cdot c_{\text{air}}} \quad (13)$$

где  $\rho_{\text{gas}}$ ,  $\rho_{\text{air}}$  – плотности газа и воздуха соответственно, кг/м³;  $c_{\text{gas}}$ ,  $c_{\text{air}}$  – удельные массовые теплоемкости газа и воздуха соответственно, Дж/(кг·K);  $t_{\text{mix}}^{\text{ex.gen.}}$ ,  $t_{\text{gas}}$  – температура топливной смеси для варианта с ДГА и температура газа после ДГА, °C;  $\bar{V}_{\text{air}}$  – удельный объем воздуха для сжигания 1 н.м³ природного газа, н.м³/н.м³.



Разница температур топливной смеси для вариантов с дросселированием и ДГА находится из зависимости:

$$\Delta t_{\text{mix.}} = t_{\text{mix.}}^{\text{thrl.}} - t_{\text{mix.}}^{\text{ex.gen.}} = \frac{l_{\text{ex.gen.}}}{c_p' \cdot \eta_{\text{E.M.}}} \cdot \frac{\rho_{\text{gas}} \cdot c_{\text{gas}}}{\rho_{\text{gas}} \cdot c_{\text{gas}} + \bar{V}_{\text{air}} \cdot \rho_{\text{air}} \cdot c_{\text{air}}} \quad (14)$$

Удельная полезная работа ДВС будет находиться по формуле:

$$l_{\text{int.comb.eng.}} = Q \cdot \eta_{\text{int.comb.eng.}}(t_{\text{mix}}) \quad (15)$$

где  $\eta_{\text{int.comb.eng.}}$  – эффективный к.п.д. ДВС по выработке электроэнергии.

При  $t_{\text{air}} \in [t_{\text{mix}}^{\text{opt.}}; t_{\text{mix}}^{\text{max}} + \Delta t_{\text{mix}}]$  изменение удельных полезных работ ДВС для схем с детандером и дросселированием определяется по формуле:

$$\Delta l_{\text{int.comb.eng.}} = Q \cdot (\eta_{\text{int.comb.eng.}}(t_{\text{mix.}}^{\text{ex.gen.}}) - \eta_{\text{int.comb.eng.}}(t_{\text{mix.}}^{\text{thrl.}})) \quad (16)$$

В остальных случаях приращение удельной полезной работы ДВС равно нулю.

Удельные затраты электроэнергии на охлаждение смеси в парокompрессионной холодильной машине равны:

$$l_{\text{cool.}} = \frac{1}{\varepsilon_{\text{cool.}}} \cdot (\rho_{\text{air}} \cdot \bar{V}_{\text{air}} \cdot c_{\text{air}} + \rho_{\text{gas}} \cdot c_{\text{gas}}) \cdot (t_{\text{mix.}} - t_{\text{mix.}}^{\text{max}}) \quad (17)$$

где  $l_{\text{cool.}}$  – удельные затраты электроэнергии на охлаждение топливной смеси, Дж/н.м<sup>3</sup>; X – температура наружного воздуха, °C; Y – удельная экономия топлива, н.м<sup>3</sup>/н.м<sup>3</sup>.

Рис.2. Зависимость величины удельной эконо-

$\varepsilon_{\text{cool.}}$  – холодильный коэффициент;  $t_{\text{mix.}}^{\text{max}}$  – максимально допустимая температура топливной смеси, °C.

При  $t_{\text{air}} \geq t_{\text{mix.}}^{\text{max}}$  разница удельных затрат электроэнергии на охлаждение топливной смеси для схем с ДГА и дросселированием определяется по формуле:

$$\Delta l_{\text{cool.}} = l_{\text{cool.}}(t_{\text{mix.}}^{\text{thrl.}}) - l_{\text{cool.}}(t_{\text{mix.}}^{\text{ex.gen.}}) \quad (18)$$

В остальных случаях разница удельных затрат электроэнергии на охлаждение смеси равна нулю.

Приращение суммарной удельной полезной работы по выработке электроэнергии равно:

$$\Delta l_{\Sigma} = l_{\text{ex.gen.}} + \Delta l_{\text{int.comb.eng.}} + \Delta l_{\text{cool.}} \quad (19)$$

где  $\Delta l_{\text{int.comb.eng.}}$  – разница величин удельных полезных работ ДВС, Дж/н.м<sup>3</sup>;  $\Delta l_{\text{cool.}}$  – разница удельных затрат электроэнергии на охлаждение топливной смеси, Дж/н.м<sup>3</sup>.

Определим удельную экономию топлива от применения ДГА на когенерационных котельных с газопоршневыми ДВС. Величина входного абсолютного давления газа принимаем 7 бар, давление газа на выходе из детандера принято равным 1,2 бар. Величина внутреннего относительного к.п.д. детандера принята равной 75%, значение электромеханического к.п.д. ДГА – 95%. Значения к.п.д. ДВС получены на основе анализа данных эксплуатации двигателя Caterpillar G3516 на когенерационной котельной (ООО «Экомол» г.Липецк). Для температур топливной смеси от -30°C (минимально допустимая температура) до +25°C (оптимальная температура) значение к.п.д. ДВС составляет 39%. При температурах смеси от +25°C до +35°C (максимально допустимая температура) происходит линейное уменьшение к.п.д. ДВС до 37%. Величина холодильного коэффициента парокompрессионных холодильных машин равна 2,8.

На рисунке 2 приведен график зависимости удельной экономии топлива от температуры наружного воздуха при применении ДГА на когенерационной котельной с ДВС.

**мии топлива от температуры наружного воздуха при применении ДГА на когенерационной котельной с ДВС.<sup>1</sup>**

Результаты расчета показывают, что зависимость энергетического эффекта от температуры наружного воздуха можно разбить на 4 условные области, ограниченные значениями температур наружного воздуха.

В первой области температура наружного воздуха меньше оптимальной температуры смеси. В этом случае параметры газа после детандера не влияют на к.п.д. ДВС, поэтому удельная экономия топлива определяется только величиной удельной полезной работы ДГА.

Вторая область находится в диапазоне от оптимальной до максимально допустимой температуры смеси. В этой области удельная экономия топлива зависит от изменения значений работы газопоршневых ДВС для сравниваемых схем, вызванного снижением температуры смеси вследствие охлаждения газа в детандере. С ростом температуры воздуха удельная экономия топлива существенно увеличивается, так как разница удельных работ ДВС для схем с ДГА и дросселированием может в несколько раз превосходить работу детандера. Максимальное значение экономии топлива достигается при температуре воздуха, равной максимально допустимой температуре смеси.

В третьей области температура наружного воздуха больше максимально допустимой температуры смеси. Удельная экономия топлива в этой области определяется величинами удельной полезной работы ДГА, разницей удельных работ ДВС и затратами электроэнергии на охлаждение топливной смеси для схем с ДГА и дросселированием. Удельная экономия топлива при росте температуры наружного воздуха уменьшается, что объясняется постоянством величины удельной работы ДВС для схемы с дросселированием и снижением величины удельной полезной работы ДВС для схемы с ДГА.

В четвертой области температура смеси для схемы с ДГА будет больше максимальной температуры смеси, поэтому ДВС для обоих сравниваемых вариантов будет работать с минимальным к.п.д. Удельная экономия топлива в данной области определяется в основном значением работы детандера и в меньшей степени величиной разницы удельных затрат электроэнергии на охлаждение топливной смеси для вариантов с дросселированием и применением ДГА.

### Заключение

Результаты анализа применения ДГА на энергетических предприятиях показывают, что удельная экономия топлива в первом приближении определяется величиной приращения суммарной удельной полезной работы.

При использовании ДГА на ТЭЦ выявлено, что приращение суммарной удельной полезной работы будет меньше работы ДГА, так как охлаждение газа в детандере отрицательно сказывается на эффективности паротурбинного цикла. Проведенный анализ позволяет сделать вывод о желательности применения предварительного подогрева газа перед ДГА на ТЭЦ, что позволит увеличить удельную работу паротурбинного цикла по сравнению со схемой с применением детандера без подогрева, а также повысить значение удельной работы ДГА.

При использовании ДГА на когенерационных котельных при температурах воздуха ниже оптимальной температуры смеси приращение суммарной удельной полезной работы равно удельной работе ДГА. В этом случае можно рекомендовать применение предварительного подогрева газа для увеличения работы детандера. При более высоких температурах воздуха приращение суммарной удельной полезной работы может в несколько раз превысить удельную работу собственно ДГА за счет увеличения работы ДВС вследствие охлаждения газа и снижения температуры топливной смеси. В данном температурном диапазоне применение подогрева может быть энергетически нецелесообразно, так как снижает полезное влияние от охлаждения газа в детандере на работу ДВС.

Таким образом, большую относительную эффективность дает применение детандер-генераторных агрегатов на когенерационных котельных по сравнению с теплоэлектроцентралями, что объясняется спецификой влияния температуры газа на эффективность работы энергопроизводящего оборудования.

Оценку эффективности применения ДГА по величине приращения суммарной удельной полезной работы можно применять для определения энергетического эффекта от использования ДГА на различных энергетических предприятиях.

### APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

**Fig.1.** Dependence of the specific fuel economy value on the ambient air temperature when using the Ex-

pander Generator at the cogeneration plant. ( $X$  – ambient air temperature, °C;  $Y$  – specific fuel economy,  $n.m^3 / n.m^3$ ).

**Fig.2.** Dependence of the specific fuel economy value on the ambient air temperature when using the Expander Generator at the cogeneration plant with the internal combustion engine. ( $X$  – ambient air temperature, °C;  $Y$  – specific fuel economy,  $n.m^3 / n.m^3$ ).

### Литература (References)

- [1] Daneshi H., Khorashadi Z., A. Lotfjou C. Turboexpander as a distributed generator. Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. New York, 2008, pp. 1–7.
- [2] Mehdi T. J., Hasan R., Hossein A. A. Modeling turbo-expander systems. Simulation, 2013, vol.89, no 2, pp. 234-248.
- [3] Taleshian J. M., Rastegar H., Pichan M. Voltage improvement using a new control strategy for turbo-expander driving systems. Electrical Power and Energy Systems, 2015, vol. 64, pp. 1176–1184.
- [4] Cleveland A. Power Generation with Turbo-expander. The American Society of Mechanical Engineers, 1990, vol.90, no 2, pp. 26-31.
- [5] Bloch H. P., Claire S. Turboexpander and Process Applications. Boston, Gulf Professional Publishing, 2001, pp. 523.
- [6] Peirs J., Reynaerts D., Verplaetsen F. A microturbine for electric power generation. Sensors and Actuators, 2004, vol.113, pp. 86–93, 2004.
- [7] Krähenbühl D., Zwysig 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, no 19, pp. 1-7.
- [8] Quoilin S., Lemort V., Lebrun J. Experimental study and modeling of an Organic Rankine Cycle using scroll expander. Applied Energy, 2010, vol.87, pp. 1260–1268.
- [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, vol.29, pp. 3094–3102.
- [10] Maddaloni J. D., Rowe A. M. Natural gas exergy recovery powering distributed hydrogen production, International Journal of Hydrogen Energy, 2007, vol.32, pp 557–566.
- [11] Mehdi B. T., Rastegar H. Modular Modeling of Turbo-Expander Driven Generators for Power System Studies. Transactions on Electrical and Electronic Engineering, IEEJ Trans., 2009, vol.4, pp. 645–653.
- [12] Mehdi B. T., Rastegar H. Flicker Assessment of Turbo-Expander Driven Synchronous Generator in Power Distribution Network. Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, 2010, no 7, pp. 53-59.
- [13] Mehdi T. J., Rastegar H., Askarian H. Modeling and Power Quality Improvement of Turbo-Expander Driving an Induction Generator. International Journal of Energy Engineering, 2012, no 2, pp. 131-137.
- [14] Norouzi M. A., Olamaei J., Gevork B. G. Compensation of voltage sag and flicker during thermal power -plant turbo- expander operation by dynamic voltage restorer, International Transactions on Electrical Energy Systems, 2015, vol. 26, no 1, pp. 16-31 .
- [15] Mehdi T. J., Rastegar H., Pichan M. Induction generator voltage improvement using a new control strategy for turbo-expander driving systems. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, vol.64, pp. 68-76.
- [16] Agababov, V.S. K voprosu analiza effektivnosti ispol'zovaniya turbodetanderov v skhemakh teplovykh elektrostantsiy [On the issue of analyzing the efficiency of using turbine expanders in the schemes of thermal power plants] / V.S.Agababov // Energoberezheniye i vodopodgotovka. - 2017. - № 2 (106). – pp. 71-73. (In Russian).
- [17] Agababov, V.S. Vliyaniye detander-generatornogo agregata na pokazateli teplovoy ekonomichnosti teploelektrotsentrali [Influence of the expander-generator unit on the thermal efficiency of the heat and power plant] / B.C.Agababov // Vestnik MEI. 2002. №5. pp. 48-52. (In Russian).
- [18] Agababov, V.S. Izmeneniye udel'nogo rashoda topliva na elektrostantsii kondensatsionnogo tipa pri vklyuchenii v yeye teplovuyu skhemu detander-generatornogo agregata [Change in specific fuel consumption in a condensing type power plant when the expander-generating unit is included in its thermal circuit] / B.C.Agababov, E.K.Arakelyan, A.B. Koryagin //Izv. Vuzov. Problemyenergetiki. 2000. № 3-4. pp. 42-47. (In Russian).
- [19] Wichterle I., Kobayashi R. Vapor-liquid equilibrium of methane-ethanepropane system at low temperatures and high pressures. Journal of Chemical and Engineering Data, 1972, vol.17, no 1, pp.13-18.
- [20] Weise H.C., Jacobs J., Sage B.H. Phase equilibria in the hydrocarbon systems. Phase behavior in the methane-propane-n-butane system. Journal of Chemical and Engineering Data, 1970, vol.15, no 1, pp.82-91.
- [21] Aungier. R. Turbine aerodynamics: axial-flow and radial-flow turbine design and

- analysys. New York, The American Society of Mechanical Engineers, 2006, p. 420
- [22] Hawkes A. D., Leach M. A. Cost-effective operating strategy for residential micro-combined heat and power. *Energy*, 2007, vol. 32, no. 5, pp. 711-723.

- [23] Liu M., Shi Y., Fang F. Combined cooling heating and power systems: A survey. *Renewable Sustain. Energy Rev.*, 2014, vol. 35, pp. 1-2.

**Сведения об авторах.**



**Губарев Василий Яковлевич**, кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики Липецкого государственного технического университета (ФГБОУ ВО «ЛГТУ»). Область научных интересов: теплообмен при взаимодействии двухфазных газожидкостных потоков с высокотемпературной поверхностью, кавитационные процессы, системы комбинированного производства энергии, тепловые режимы различных тепло-технологических установок, энергосбережение.  
E-mail: [gv\\_lipetsk@rambler.ru](mailto:gv_lipetsk@rambler.ru)



**Арзамасцев Алексей Геннадьевич**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики Липецкого государственного технического университета (ФГБОУ ВО «ЛГТУ»). Область научных интересов: тепломассообмен при течении двухфазных потоков, тепловые режимы теплотехнологических установок, энергосбережение.  
E-mail: [arzamastcev-ag@mail.ru](mailto:arzamastcev-ag@mail.ru)



**Шарапов Алексей Иванович**, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики Липецкого государственного технического университета (ФГБОУ ВО «ЛГТУ»). Область научных интересов: теплофизика металлургических процессов, исследование теплообмена в двухфазных потоках, инженерные сети и системы зданий и сооружений промышленных и гражданских объектов.  
E-mail: [sharapov-lipetsk@yandex.ru](mailto:sharapov-lipetsk@yandex.ru)



**Картель Александр Юрьевич**, ассистент кафедры промышленной теплоэнергетики Липецкого государственного технического университета (ФГБОУ ВО «ЛГТУ»). Область научных интересов: тепловые режимы теплотехнологических установок, охрана окружающей среды, энергосбережение.  
E-mail: [zetzervam@gmail.com](mailto:zetzervam@gmail.com)