



# Tabiiy gaz bosimini pasaytirish punktlarida detander-generator qurilmalarining xususiyatlarini o'rganish

Abdurahim D. Taslimov<sup>1</sup>, Arsen A. Mukolyants<sup>1, a)</sup>, Jonibek M. Nizomov<sup>1, b)</sup>

<sup>1</sup> DSc, prof., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; [ataslimov@mail.ru](mailto:ataslimov@mail.ru)  
<http://orcid.org/0000-0003-2856-6287>

<sup>1, a)</sup> PhD, dots. Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; [arsenm5675@gmail.com](mailto:arsenm5675@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-7943-8413>

<sup>1, b)</sup> Bachelor, Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; [njonibek04@gmail.com](mailto:njonibek04@gmail.com)

**Dolzarblik:** ish, detander-generator qurilmalarining xususiyatlarini o'rganish va detander-generator fregatini kirish qismida gazni isitishning maqbul usulini tanlash zarurati bilan bog'liq bo'lib, u asosan elektr energiyasini ishlab chiqarish uchun maxsus yoqilg'i sarfini aniqlaydi. Uzoq masofadagi gaz taqsimlash stantsiyalari va gaz boshqarish punktlari uchun avtonom qurilmalar sifatida ishlatiladigan detander-generator agregatining turli parametrlari, detanderlashdan oldin gazni isitish usullarini, masalan, qozon va gaz turbinasi qurilmalarining chiqindi gazlaridan foydalanish hisobga olgan holda, tahlil qilinadi. Hisob-kitoblar shuni ko'rsatdiki, gazni ozgina isitish uchun qozonda isitishni ishlatish afzalroqdir va gazni isitish harorati ko'tarilganda, gaz turbinasi qurilmasi tutun gazlaridan foydalanish iqtisodiy jihatdan foydali bo'ladi.

**Maqsad:** korxonada DGA dan foydalanish to'g'risida qaror qabul qilishda asosiy omil hisoblanadigan va DGA samaradorligini oshirishga va elektr energiyasini ishlab chiqarish xarajatlarini kamaytirishga imkon beradigan ixtisoslashgan qozon yoki gaz turbinasi qurilmasi yordamida gazni isitishning maqbul usulini tanlash.

**Usullar:** ishda qo'yilgan vazifalarni yechishda texnik termodinamikaning nazariy usullari va eksperimental yondashuvlarni o'z ichiga olgan kompleks usul qo'llanilgan. Nazariya va amaliyotning hozirgi holatini tahlil qilish, shuningdek, turbinli tipdagi sozlanishi detander bilan reduksiya liniyasining natural modelida tajribalar o'tkazildi.

**Natijalar:** isitishning turli xil variantlari bo'yicha olingan natijalar shuni ko'rsatdiki, gazni isitish uchun gaz turbinasi qurilmasi tutun gazlaridan foydalanish eng katta quvvatni ta'minlaydi. Har xil gaz bosimi va isitish haroratida elektr energiyasini ishlab chiqarish uchun o'ziga xos yoqilg'i sarfini tahlil qilish shuni ko'rsatdiki, kichik isitishda qozonda isitishdan foydalanish foydaliroq bo'ladi, gazni isitish harorati ko'tarilganda esa gaz turbinasi qurilmasi tutun gazlaridan foydalanish iqtisodiy jihatdan maqsadga muvofiq bo'ladi.

**Kalit so'zlar:** tabiiy gaz, gazni kengaytirish, gazni isitish, elektr energiyasini ishlab chiqarish, gazni qozonda isitish, gaz turbinasi qurilmasi, detander-generator agregati, GTU chiqindi gazlari.

## Изучение характеристик детандер-генераторных установок на пунктах понижения давления природного газа

Абдурахим Д. Таслимов<sup>1</sup>, Арсен А. Мукольянц<sup>1, a)</sup>, Жонибек М. Низомов<sup>1, b)</sup>

<sup>1</sup> DSc, проф., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; [ataslimov@mail.ru](mailto:ataslimov@mail.ru) <http://orcid.org/0000-0003-2856-6287>

<sup>1, a)</sup> PhD, доц. Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; [ataslimov@mail.ru](mailto:ataslimov@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0002-7943-8413>

<sup>1, b)</sup> Бакалавр, Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; [njonibek04@gmail.com](mailto:njonibek04@gmail.com)

**Актуальность:** работа обусловлена необходимостью изучения характеристик детандер-генераторных установок и выбора оптимального способа подогрева газа на входе в детандер-генераторный агрегат, который в значительной степени определяет удельный расход топлива на выработку электроэнергии. Анализируются различные параметры детандер-генераторного агрегата, используемого в качестве автономных установок для удаленных газораспределительных станций и газорегуляторных пунктов, с учетом методов подогрева газа перед детандированием, таких как использование котлов и выхлопных газов от газотурбинных установок. Расчеты показали, что при незначительном подогреве предпочтительнее использовать подогрев в котле, а при повышении температуры подогрева газа экономически более выгодным становится использование дымовых газов от газотурбинной установки.

**Цель:** выбрать оптимальный способ подогрева газа используя специализированный котёл или газотурбинную установку позволяющие повысить эффективность работы ДГА и снизить затраты на производство электроэнергии, что является главным фактором при принятии решения об использовании ДГА на предприятии.

**Методы:** в работе при решении поставленных задач использовался комплексный подход, включающий теоретические методы технической термодинамики и экспериментальные подходы. Проведен анализ текущего состояния теории и практики, также выполнены эксперименты на натурной модели линии

**For citation:** A.D. Taslimov, A.A. Mukolyants, J.M. Nizomov. Studying the characteristics of expander-generator units at natural gas pressure reduction points. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2024, no. 4, pp. 82-90.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.14564831>

Received: 20.10.2024

Revised: 13.11.2024

Accepted: 5.12.2024

Published: 27.12.2024

**Copyright:** © Abdurahim D. Taslimov, Arsen A. Mukolyants, Jonibek M. Nizomov, 2024. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



редуцирования с регулируемым детандером турбинного типа.

**Результаты:** полученные результаты при разных вариантах подогрева показали, что наибольшую мощность обеспечивает использование дымовых газов от газотурбинной установки для подогрева газа. Анализ удельного расхода топлива на производство электроэнергии при различных давлениях газа и температурах подогрева показал, что при небольшом подогреве более выгодным является использование подогрева в котле, тогда как при повышении температуры подогрева газа использование дымовых газов от газотурбинной установки становится экономически более целесообразным.

**Ключевые слова:** природный газ, расширение газа, подогрев газа, выработка электроэнергии, подогрев газа в котле, газотурбинная установка, детандер-генераторный агрегат, выхлопные газы ГТУ.

## Studying the characteristics of expander-generator units at natural gas pressure reduction points

Abdurahim D. Taslimov<sup>1</sup>, Arsen A. Mukolyants<sup>1,a)</sup>, Jonibek M. Nizomov<sup>1,b)</sup>

<sup>1</sup> DSc, prof., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; [ataslimov@mail.ru](mailto:ataslimov@mail.ru)  
<http://orcid.org/0000-0003-2856-6287>

<sup>1,a)</sup> PhD, dots. Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; [arsenm5675@gmail.com](mailto:arsenm5675@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-7943-8413>

<sup>1,b)</sup> Bachelor, Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; [njonibek04@gmail.com](mailto:njonibek04@gmail.com)

**Relevance:** the work is conditioned by the need to study the characteristics of expander-generator units and choose the optimal method of heating gas at the inlet to the expander-generator unit, which largely determines the specific fuel consumption for electricity generation. Various parameters of the expander-generator unit used as autonomous installations for remote gas-distribution stations and gas-control points are analyzed, taking into account the methods of heating gas before gas expansion, such as the use of boilers and exhaust gases from gas turbine unit. Calculations have shown that with low heating, it is preferable to use heating in the boiler, and with an increase in the gas heating temperature, it becomes economically more profitable to use flue gases from a gas turbine unit.

**Aim:** to choose the optimal method of heating gas using a specialized boiler or gas turbine unit, which allows to increase the efficiency of the EGU and reduce the cost of electricity production, which is the main factor when deciding on the EGU at the enterprise

**Methods:** in the work, an integrated method was used to solve the tasks set, including theoretical methods of technical thermodynamics and experimental approaches. The analysis of the current state of theory and practice has been carried out, experiments have also been performed on a full-scale model of a reduction line with an adjustable turbine-type expander.

**Results:** the results obtained for different heating options showed that the highest power is provided by the use of flue gases from a gas turbine installation for gas heating. An analysis of the specific fuel consumption for electricity production at different gas pressures and heating temperatures showed that with a small heating, it is more profitable to use heating in the boiler, whereas with an increase in the gas heating temperature, the use of flue gases from a gas turbine installation becomes more economically feasible.

**Keywords:** natural gas, gas expansion, gas heating, electricity generation, gas heating in the boiler, gas turbine unit, expander generator unit, exhaust gases of GTU.

### 1. Введение (Introduction)

В последнее время растет интерес к детандер-генераторным агрегатам (ДГА), применяемым для производства электроэнергии. Эти устройства работают на основе перепада давления природного газа на газораспределительных станциях (ГРС) и газорегуляторных пунктах (ГРП). Эффективность их работы во многом зависит от способа подогрева газа [1-4]. В данной статье анализируются различные параметры ДГА в качестве автономных установок для удаленных ГРС и ГРП, с учётом методов подогрева газа перед детандированием, таких как использование котлов и выхлопных газов от газотурбинных установок (ГТУ).

Отдельно стоящая установка представляет собой детандер-генератор, который не имеет организационной или технологической связи с газоиспользующими предприятиями. Включение таких агрегатов не оказывает влияния на работу газоиспользующих установок, за исключением возможных изменений в расходе газа, вызванных изменением его температуры на выходе, и потребления электроэнергии для собственных нужд. Основное назначение таких установок — производство электроэнергии для нужд предприятия или её передача во внешнюю сеть.

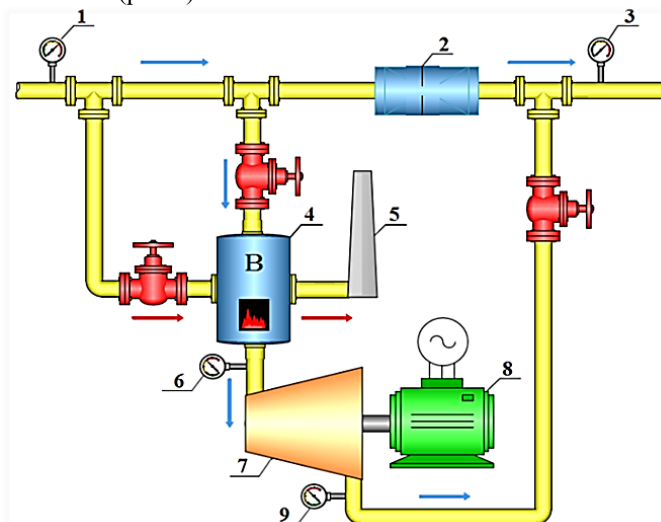
При включении ДГА изменение расхода газа на газопотребляющее оборудование пропорционально изменению располагаемой теплоты газа, выраженной формулой:

$$Q_{\text{ГТГ}} = Q_{\text{ГТГ}} + h_{\text{Г}} - h_0,$$

где  $h_T, h_0$  - энтальпия газового топлива при заданных температуре и давлении, и при  $0^\circ\text{C}$  и давлении  $0,1$  МПа соответственно, кДж/кг, а  $Q_{\text{нтс}}$  - низшая теплота сгорания топлива, Дж/кг. Изменение расхода топлива в газопотребляющем оборудовании будет учитываться с учетом работы ДГА.

## 2. Материалы и методы (Materials and Methods)

Один из наиболее простых методов подогрева газа перед детандером — это использование специализированного котла (рис.1).



**Рис.1.** ДГА с подогревом газа в котле: 1-манометр измеряющий входное давление; 2- дроссельное устройство; 3-манометр измеряющий выходное давление; 4-котел; 5-выхлопная труба; 6- манометр измеряющий давление перед детандером; 7-детандер; 8-генератор; 9- манометр измеряющий давление после детандера

**Fig.1.** EGU with gas heating in the boiler: 1- manometer measuring the inlet pressure, 2- throttle device, 3-manometer measuring the outlet pressure, 4- boiler, 5-chimney, 6- manometer measuring the pressure before the expander, 7-expander, 8-generator, 9- manometer measuring pressure after expander

В случае если энтальпия газа на выходе из детандера  $h_2$ , кДж/кг, такая же, как на входе в установку,  $h_{\text{вх}}$ , кДж/кг, то мощность детандера  $N_{\text{ДГА}}$ , кВт, и расход топлива на подогрев газа перед детандером  $\Delta G_{\text{топ}}^{\text{пер}}$ , кг/с, определяются из выражений [5,6]:

$$N_{\text{ДГА}} = G_{\text{топ}} \cdot (h_1 - h_2) \quad \text{и} \quad \Delta G_{\text{топ}}^{\text{пер}} = \frac{G_{\text{топ}} \cdot (h_1 - h_2)}{Q_{\text{нтс}} \cdot \eta_k},$$

а удельный расход топлива при выработке электроэнергии установкой  $G_{\text{урт}}$ , кг/с·Дж, рассчитывается как:

$$G_{\text{урт}} = \frac{1}{Q_{\text{нтс}} \cdot \eta_k},$$

где  $\eta_k$  - КПД котла, который предварительно подогревает газ перед его поступлением в детандер;

$G_{\text{топ}}$  - расход топлива в трубопроводе, кг/с;

$h_1$  и  $h_2$  - энтальпия газа до и после детандера, соответственно, кДж/кг.

Если  $h_{\text{вх}} \neq h_2$  и изменение энтальпии газа при его поступлении в газопотребляющую установку влечет изменение его расхода (как, например, при использовании газа в качестве топлива), то формулы примут следующий вид:

а) новый расход газа на газопотребляющую установку  $G_{\text{топ}}^{\text{нов}}$ , кг/с, (изменяется обратно пропорционально располагаемой теплоте топлива):



$$G_{\text{топ}}^{\text{нов}} = G_{\text{топ}} \cdot \frac{Q_{\text{нтс}} + h_{\text{вх}} - h_0}{Q_{\text{нтс}} + h_2 - h_0},$$

где  $h_{\text{вх}}$  – энтальпия газа на входе в установку, кДж/кг;

б) расход топлива на подогрев газа в котле  $\Delta G_{\text{топ}}^{\text{под}}$ , кг/с, :

$$\Delta G_{\text{топ}}^{\text{под}} = \frac{G_{\text{топ}} \cdot (h_1 - h_{\text{вх}})}{(Q_{\text{нтс}} + h_2 - h_{\text{вх}}) \cdot \eta_{\text{к}}};$$

в) общее изменение расхода газа  $\Delta G_{\text{топ}}$ , кг/с:

$$\Delta G_{\text{топ}} = \Delta G_{\text{топ}}^{\text{под}} + G_{\text{топ}}^{\text{нов}} - G_{\text{топ}} = \frac{G_{\text{топ}} \cdot (h_1 - h_{\text{вх}})}{(Q_{\text{нтс}} + h_2 - h_{\text{вх}}) \cdot \eta_{\text{к}}} \cdot \left[ 1 + \frac{(h_{\text{вх}} - h_2) \cdot \eta_{\text{к}}}{(h_1 - h_{\text{вх}})} \right];$$

г) мощность ДГА, кВт:

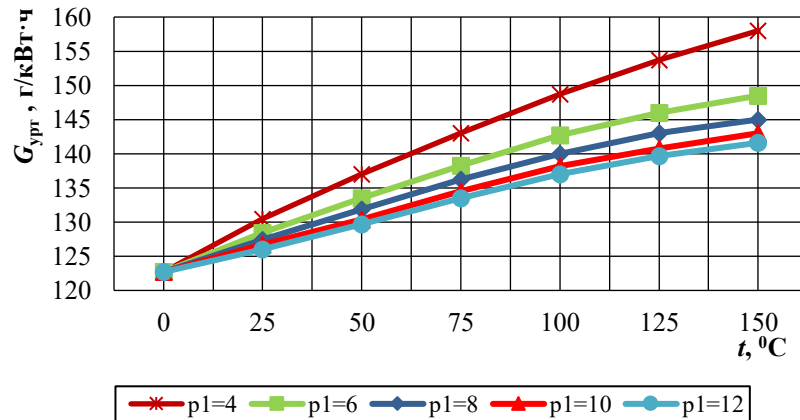
$$N_{\text{ДГА}} = G_{\text{топ}} \cdot \frac{Q_{\text{нтс}} + h_{\text{вх}} - h_0}{Q_{\text{нтс}} + h_2 - h_0} \cdot (h_1 - h_2);$$

д) удельный расход топлива на выработку электроэнергии (все изменение расхода топлива относится на выработку электроэнергии), кг/с·кВт:

$$G_{\text{урт}} = \frac{\Delta G_{\text{топ}}}{N_{\text{ДГА}}} = \frac{1}{(Q_{\text{нтс}} + h_2 - h_0) \cdot \eta_{\text{к}}} \cdot \frac{(h_1 - h_{\text{вх}})}{(h_1 - h_2)} \cdot \left[ 1 + \frac{(h_{\text{вх}} - h_2) \cdot \eta_{\text{к}}}{(h_1 - h_{\text{вх}})} \right]. \quad (1)$$

### 3. Результаты исследования (Results)

Результаты расчета удельного расхода топлива для производства электроэнергии, выполненные с использованием формулы (1), представлены на графике (рис.2). Эти результаты демонстрируют зависимость удельного расхода от температуры газа перед детандером и различных входных давлений газа в детандер при фиксированных значениях ( $p_2 = 1,5 \text{ кг/см}^2$  и  $\eta_{\text{к}} = 0,9$ ).



**Рис.2.** Удельный расход топлива на выработку электроэнергии

**Fig.2.** Specific fuel consumption for electricity generation

Из графика следует, что температура газа оказывает минимальное влияние на удельный расход топлива. Существенное влияние на изменение расхода оказывает эффективность котла, используемого для подогрева газа.

Если изменение энтальпии газа на входе в газопотребляющую установку не оказывает влияния на расход газа, то формулы упрощаются и принимают вид:

а) общее изменение расхода газа  $\Delta G_{\text{топ}}$  равно расходу топлива на подогрев газа в котле  $\Delta G_{\text{топ}}^{\text{под}}$

$$\Delta G_{\text{топ}} = \Delta G_{\text{топ}}^{\text{под}} = \frac{G_{\text{топ}} \cdot (h_1 - h_{\text{вх}})}{(Q_{\text{нтс}} + h_{\text{вх}} - h_0) \cdot \eta_{\text{к}}};$$

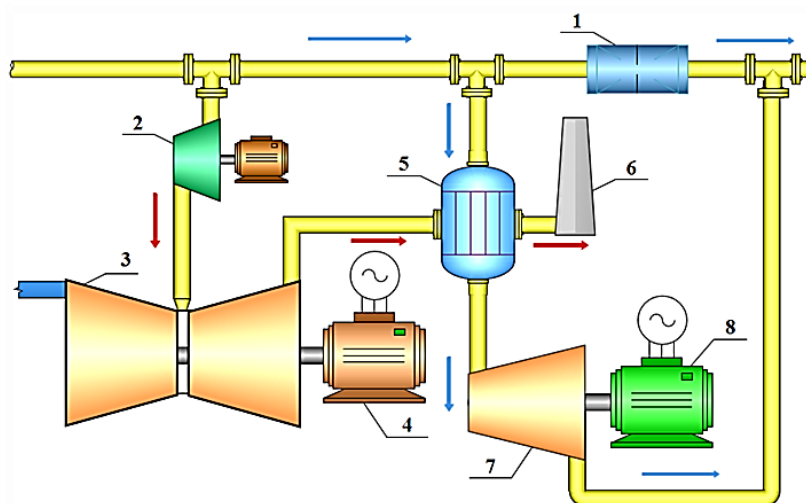
б) мощность ДГА, кВт:

$$N_{\text{ДГА}} = G_{\text{топ}} \cdot (h_1 - h_2);$$

в) удельный расход топлива на выработку электроэнергии, кг/с·Дж:

$$G_{\text{урт}} = \frac{1}{(Q_{\text{нтс}} + h_{\text{вх}} - h_0) \cdot \eta_{\text{к}}} \cdot \frac{(h_1 - h_{\text{вх}})}{(h_1 - h_2)} \approx \frac{1}{Q_{\text{нтс}} \cdot \eta_{\text{к}}} \cdot \frac{(h_1 - h_{\text{вх}})}{(h_1 - h_2)}. \quad (2)$$

Использование теплоты, которая выделяется уходящими газами газотурбинной установки, может быть одним из способов подогрева газа (рис.3) перед турбодетандером [7-9].



**Рис.3.** Подогрев газа уходящими газами ГТУ: 1- дроссельное устройство, 2-компрессор, 3-газотурбинная установка (ГТУ), 4-генератор ГТУ, 5-теплообменник, 6- выхлопная труба, 7-детандер, 8-генератор

**Fig.3.** Heating the gas with exhaust gases from GTU: 1- throttle device, 2-compressor, 3-gas-turbine unit, 4-GTU generator, 5-heat exchanger, 6- chimney, 7-expander, 8-generator

При оценке характеристик такой установки рассмотрим ситуацию, когда энтальпия газа на выходе из детандера равна энтальпии на входе в установку.

Для расчета мощности, необходимой газотурбинной установки, применяется следующий принцип: если энтальпии на входе и выходе из установки равны, то количество тепла, подведенное к газу,  $Q_{\text{подв}}$  соответствует мощности детандер-генераторной установки  $N_{\text{ДГА}}$ .

Общее количество тепла, передаваемое дымовыми газами  $Q_{\text{дг}}$  после их прохождения через газотурбинную установку, должно быть равно сумме мощности детандер-генераторной установки и тепла, которое теряется с газами после их прохождения через теплообменник:

$$Q_{\text{дг}} = N_{\text{ДГА}} + Q_{\text{ут}}, \quad (3)$$

где:  $N_{\text{ДГА}}$  - мощность ДГА, кВт;  $Q_{\text{ут}}$  - теплота уходящих газов, Дж.

Величина  $Q_{\text{ут}}$  равна:

$$Q_{\text{ут}} = Q_{\text{дг}} \cdot (1 - \eta_{\text{ту}}); \quad \eta_{\text{ту}} = Q_{\text{подв}} / Q_{\text{дг}},$$

где:  $\eta_{\text{ту}}$  - коэффициент полезного действия теплообменника-утилизатора, в котором подогревается газ;  $Q_{\text{подв}}$  - теплота, подводимая к газу перед детандером, Дж.

Значение  $\eta_{\text{ту}}$  можно оценить по формуле:

$$\eta_{\text{ту}} = \frac{h_{\text{дг}} - h_{\text{ут}}}{h_{\text{дг}} - h_{\text{хв}}} \cong \frac{t_{\text{дг}} - t_{\text{ут}}}{t_{\text{дг}} - t_{\text{хв}}},$$

где:  $h_{\text{дг}}, h_{\text{ут}}, h_{\text{хв}}$  - энтальпия дымовых газов на выходе ГТУ, уходящих газов после теплообменника-утилизатора и при температуре холодного воздуха, соответственно, кДж/кг;

$t_{\text{дг}}, t_{\text{ут}}, t_{\text{хв}}$  - температура дымовых газов на выходе ГТУ, уходящих газов после теплообменника-утилизатора и при температуре холодного воздуха, соответственно, °С.



Минимально допустимая температура уходящих газов  $t_{\text{уг}}$  равна точке росы и, следовательно:

$$Q_{\text{уг}} = Q_{\text{дг}} \cdot \frac{t_{\text{уг}} - t_{\text{хв}}}{t_{\text{дг}} - t_{\text{хв}}}. \quad (4)$$

Подставив выражение (4) в (3), можно получить требуемое значение  $Q_{\text{дг}}$ , Дж; ГТУ:

$$Q_{\text{дг}} = N_{\text{дгА}} \cdot \frac{t_{\text{дг}} - t_{\text{хв}}}{t_{\text{дг}} - t_{\text{уг}}}; \quad (5)$$

и мощность ГТУ составит, кВт:

$$N_{\text{ГТУ}} = N_{\text{дгА}} \cdot \frac{t_{\text{дг}} - t_{\text{хв}}}{t_{\text{дг}} - t_{\text{уг}}} \cdot \frac{\eta_{\text{ГТУ}}}{1 - \eta_{\text{ГТУ}}};$$

где  $\eta_{\text{ГТУ}}$  – КПД газотурбинной установки.

Если принять  $\eta_{\text{ГТУ}} \approx 0,3$ ;  $t_{\text{дг}} \approx 500^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{хв}} \approx 20^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{уг}} \approx 100^\circ\text{C}$ , то требуемая мощность ГТУ составит более 50% от мощности ДГА.

Удельный показатель такой установки в виде удельного расхода топлива на выработку электроэнергии  $G_{\text{урт}}$  установки равен:

$$G_{\text{урт}} = \frac{G_{\text{ГТУ}}}{N_{\text{ГТУ}} + N_{\text{дгА}}} = \frac{1}{Q_{\text{нтс}} \cdot \eta_{\text{ГТУ}}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{t_{\text{дг}} - t_{\text{уг}}}{t_{\text{дг}} - t_{\text{хв}}} \cdot \frac{1 - \eta_{\text{ГТУ}}}{\eta_{\text{ГТУ}}}\right)}.$$

Если энтальпия газа на выходе из детандера отличается от энтальпии на входе в газопотребляющую установку, рассматриваются два сценария: один с изменением расхода газа в установку после включения ДГА, а другой без такого изменения.

И тогда выражение (5) будет иметь вид:

$$Q_{\text{дг}} = G_{\text{топ}}^{\text{нов}} \cdot (h_1 - h_0) \cdot \frac{t_{\text{дг}} - t_{\text{хв}}}{t_{\text{дг}} - t_{\text{уг}}},$$

где  $G_{\text{топ}}^{\text{нов}} = G_{\text{топ}} \cdot \frac{Q_{\text{нтс}} + h_{\text{вх}} - h_0}{Q_{\text{нтс}} + h_2 - h_0}$  – расход газа после включения детандера.

Мощность ГТУ составит:

$$N_{\text{ГТУ}} = G_{\text{топ}}^{\text{нов}} \cdot \frac{Q_{\text{нтс}} + h_{\text{вх}} - h_0}{Q_{\text{нтс}} + h_2 - h_0} \cdot (h_1 - h_{\text{вх}}) \cdot \frac{t_{\text{дг}} - t_{\text{хв}}}{t_{\text{дг}} - t_{\text{уг}}} \cdot \frac{\eta_{\text{ГТУ}}}{1 - \eta_{\text{ГТУ}}},$$

а расход топлива на ГТУ будет равен:

$$G_{\text{ГТУ}} = \frac{N_{\text{ГТУ}}}{(Q_{\text{нтс}} + h_{\text{вх}} - h_0) \cdot \eta_{\text{ГТУ}}} = G_{\text{топ}}^{\text{нов}} \cdot \frac{(h_1 - h_{\text{вх}})}{Q_{\text{нтс}} + h_2 - h_0} \cdot \frac{t_{\text{дг}} - t_{\text{хв}}}{t_{\text{дг}} - t_{\text{уг}}} \cdot \frac{1}{1 - \eta_{\text{ГТУ}}}.$$

Общий расход топлива  $\Delta G_{\text{топ}}$ , включая изменения в расходе на газопотребляющее оборудование, будет равен:

$$\Delta G_{\text{топ}} = G_{\text{топ}}^{\text{нов}} \cdot \frac{(h_1 - h_{\text{вх}})}{(Q_{\text{нтс}} + h_2 - h_0)} \cdot \left( \frac{t_{\text{дг}} - t_{\text{хв}}}{t_{\text{дг}} - t_{\text{уг}}} \cdot \frac{1}{1 - \eta_{\text{ГТУ}}} + \frac{h_{\text{вх}} - h_2}{h_1 - h_{\text{вх}}} \right).$$

Общая мощность  $N_{\text{уст}}$  газотурбинной установки и детандер-генераторной установки (ДГУ) может быть определена после выполнения некоторых простых преобразований следующим образом:

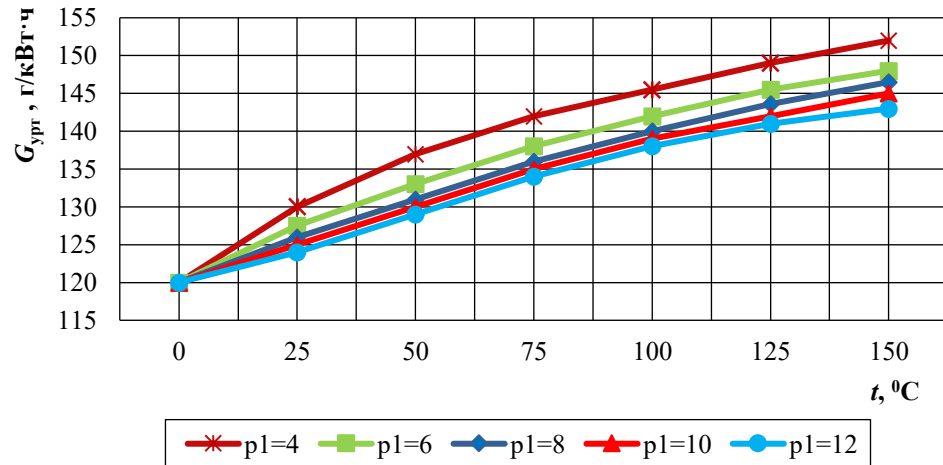
$$N_{\text{уст}} = G_{\text{топ}}^{\text{нов}} \cdot \frac{Q_{\text{нтс}} + h_{\text{вх}} - h_0}{Q_{\text{нтс}} + h_2 - h_0} \cdot (h_1 - h_2) \cdot \left( \frac{t_{\text{дг}} - t_{\text{хв}}}{t_{\text{дг}} - t_{\text{уг}}} \cdot \frac{\eta_{\text{ГТУ}}}{1 - \eta_{\text{ГТУ}}} \cdot \frac{(h_1 - h_{\text{вх}})}{(h_1 - h_2)} + 1 \right).$$

Удельный расход топлива  $G_{\text{урт}}$  на выработку электроэнергии (все изменение расхода топлива относится на выработку электроэнергии):



$$G_{\text{урт}} = \frac{1}{(Q_{\text{нтс}} + h_{\text{вх}} - h_0)} \cdot \frac{\left( \frac{t_{\text{дг}} - t_{\text{хв}}}{t_{\text{дг}} - t_{\text{уг}}} \cdot \frac{\eta_{\text{ГТУ}}}{1 - \eta_{\text{ГТУ}}} \cdot \frac{h_{\text{вх}} - h_2}{h_1 - h_{\text{вх}}} \right)}{\left( \frac{t_{\text{дг}} - t_{\text{хв}}}{t_{\text{дг}} - t_{\text{уг}}} \cdot \frac{\eta_{\text{ГТУ}}}{1 - \eta_{\text{ГТУ}}} \cdot \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{\text{вх}}} \right)} \quad (6)$$

На графике (рис.4) представлены результаты расчета удельного расхода топлива для выработки электроэнергии, выполненные по формуле (6). Эти результаты показывают, как изменяется удельный расход в зависимости от температуры газа перед детандером и различных давлений газа на входе в детандер для данного случая ( $p_2 = 1,5 \text{ кг/см}^2$ ,  $\eta_{\text{ГТУ}} = 0,3$ ).



**Рис.4.** Изменение удельного расхода топлива при повышении температуры газа перед детандером

**Fig.4.** Change in specific fuel consumption with an increase in gas temperature before the expander

Из графика рис.4 следует, что при повышении температуры газа удельный расход топлива изменяется незначительно, что соответствует изменению, показанному на рис.2.

Если изменение энтальпии газа на выходе из детандера не оказывает влияния на расход газа в газопотребляющем оборудовании, то формулы принимают следующий вид:

а) расход топлива:

$$\Delta G_{\text{топ}} = G_{\text{ГТУ}} = G_{\text{топ}} \cdot \frac{(h_1 - h_{\text{вх}})}{(Q_{\text{нтс}} + h_{\text{вх}} - h_0)} \cdot \frac{t_{\text{дг}} - t_{\text{хв}}}{t_{\text{дг}} - t_{\text{уг}}} \cdot \frac{1}{1 - \eta_{\text{ГТУ}}};$$

б) электрическая мощность:

$$N_{\text{уст}} = G_{\text{топ}} \cdot (h_1 - h_2) \cdot \left( \frac{t_{\text{дг}} - t_{\text{хв}}}{t_{\text{дг}} - t_{\text{уг}}} \cdot \frac{\eta_{\text{ГТУ}}}{1 - \eta_{\text{ГТУ}}} \cdot \frac{(h_1 - h_{\text{вх}})}{(h_1 - h_2)} + 1 \right);$$

в) удельный расход топлива на выработку электроэнергии:

$$G_{\text{урт}} = \frac{1}{(Q_{\text{нтс}} + h_{\text{вх}} - h_0)} \cdot \frac{\left( \frac{t_{\text{дг}} - t_{\text{хв}}}{t_{\text{дг}} - t_{\text{уг}}} \cdot \frac{1}{1 - \eta_{\text{ГТУ}}} \right)}{\left( \frac{t_{\text{дг}} - t_{\text{хв}}}{t_{\text{дг}} - t_{\text{уг}}} \cdot \frac{\eta_{\text{ГТУ}}}{1 - \eta_{\text{ГТУ}}} + \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_{\text{вх}})} \right)} \quad (7)$$

#### 4. Обсуждение (Discussion)

Анализ эффективности различных методов подогрева газа перед детандером предполагает, что расход газа до включения ДГА остается неизменным для всех рассматриваемых вариантов.

Проведены расчеты мощности, расхода топлива и удельного расхода топлива для различных методов подогрева газа. В анализе предполагается, что изменение температуры газа на выходе из детандера не влияет на расход газа в газопотребляющую установку.

Анализ относительных значений расхода топлива (относительно расхода на газопотребляющую установку до включения ДГА  $\Delta G_{\text{топ}} / G_{\text{топ}}$ ) для подогрева с использованием



котла и дымовых газов ГТУ показал, что при увеличении температуры подогрева газа относительное изменение расхода топлива более выражено для варианта с ГТУ, чем для котла. Это обусловлено тем, что ГТУ обеспечивает большую мощность. Следует также отметить, что при равенстве  $\eta_k = \eta_{\text{ГТУ}} \cdot (1 - \eta_{\text{ГТУ}})$  расход топлива при подогреве с помощью выхлопных газов ГТУ и в котле одинаков.

## 5. Заключение (Conclusions)

Полученные результаты расчета относительной мощности при разных вариантах подогрева показали, что наибольшую мощность обеспечивает использование дымовых газов от газотурбинной установки для подогрева газа.

Результаты расчетов удельного расхода топлива на выработку электроэнергии при различных давлениях газа и температурах подогрева показали, что при незначительном подогреве предпочтительнее использовать подогрев в котле. А при повышении температуры подогрева газа экономически более выгодным становится использование дымовых газов от газотурбинной установки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mukolyants A.A., Sotnikova I.V., Ergasheva D.K. (2023). Analysis of the joint operation of the expander-generator unit and air heat pump. E3S Web of Conferences 419, 01016. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341901016>.
2. Arsen Mukolyants, Irina Sotnikova, Dilbar Ergasheva. (2024). Investigation of a fuel-free power generating plant and evaluation of the effectiveness of its use. E3S Web of Conferences 474, 01011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447401011>.
3. Агабабов В.С., Джураева Е.В., Н.А. Зройчиков, Корягин А.В. Сравнение различных способов нагрева газа в детандер-генераторном агрегате //Теплоэнергетика. 2003. №6. -С.46-50.
4. Klimenko, A.V. Agababov, V.S. Borisova, P.N. and Petin, S.N. (2017). Thermodynamic efficiency of using expander-generator units at stations of technological pressure reduction of transported natural gas. Thermophysics and aeromechanics., No.24, P.933–940 <https://doi.org/10.1134/S0869864317060129>.
5. Об использовании ДГА в котельных /Агабабов В.С., Корягин А.В., Титов В.Л., Хаймер Ю.Ю. //Энергосбережение и водоподготовка. -2000. -№2. -С.14-18.
6. Оценка показателей детандер-генераторных агрегатов, установленных на ГРС и ГРП // Корягин А.В. /Энергосбережение и водоподготовка. -2004. -№1. -С.71-74.
7. Mukolyants A.A., Sotnikova I.V., Ergasheva D.K., Shadibekova F.T., Taubaldiev A.A. Heating of natural gas before expander-generator unite. // Journal of Physics: Conference Series 2094, 052049, 2021, - doi:10.1088/1742-6596/2094/5/052049.
8. A.A. Mukolyants, M.D. Buranov, I.V. Sotnikova and H.F. Makhmudov. Operation analysis of expander-generator unit at a gas distribution station. // Journal of Physics: Conference Series 1515, 022053, 2020, doi:10.1088/1742-6596/1515/2/022053.
9. A.A. Mukolyants, I.V.Sotnikova, D.K. Ergasheva and A.A. Taubaldiev. Expander-generator set for utilization of natural gas overpressure energy. // E3S Web of Conferences 289, 07034, 2021. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128907034>.

## REFERENCES

1. Mukolyants A.A., Sotnikova I.V., Ergasheva D.K. (2023). Analysis of the joint operation of the expander-generator unit and air heat pump. E3S Web of Conferences 419, 01016. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341901016>.
2. Arsen Mukolyants, Irina Sotnikova, Dilbar Ergasheva. (2024). Investigation of a fuel-free power generating plant and evaluation of the effectiveness of its use. E3S Web of Conferences 474, 01011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447401011>.
3. Agababov V.S., Dzhuraeva E.V., Zroychikov N.A., Koryagin, A.V. (2003). Comparison of different methods of gas heating in an expander-generator unit. *Teplenergetika.*, No. 11, P. 46–50. (In Russ.).
4. Klimenko, A.V. Agababov, V.S. Borisova, P.N. and Petin, S.N. (2017). Thermodynamic efficiency of using expander-generator units at stations of technological pressure reduction of transported natural gas. *Thermophysics and aeromechanics.*, No.24, P.933–940 <https://doi.org/10.1134/S0869864317060129>.
5. Agababov V.S., Koryagin A.V., Titov V.L. and Khaimer Yu.Yu. (2000). On the use of DGA in boiler houses. *Energy saving and water treatment.*, No.2, P.14-18. (In Russ.).





6. Koryagin A.V. (2004) Evaluation of the performance of expander-generator units installed at gas distribution stations and gas pumping stations. *Energy saving and water treatment.*, No.1, P.71-74. (In Russ.).
7. Mukolyants A.A., Sotnikova I.V, Ergasheva D.K., Shadibekova F.T., Taubaldiev A.A. Heating of natural gas before expander-generator unite. // *Journal of Physics: Conference Series* 2094, 052049, 2021, doi:10.1088/1742-6596/2094/5/052049.
8. A.A. Mukolyants, M.D. Buranov, I.V. Sotnikova and H.F. Makhmudov. Operation analysis of expander-generator unit at a gas distribution station. // *Journal of Physics: Conference Series* 1515, 022053, 2020, doi:10.1088/1742-6596/1515/2/022053.
9. A.A. Mukolyants, I.V. Sotnikova, D.K. Ergasheva and A.A. Taubaldiev. Expander-generator set for utilization of natural gas overpressure energy. // *E3S Web of Conferences* 289, 07034, 2021. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128907034>.