ISNN 3030-3907

2026/3
VOLUME 6

DEVELOPMENT OF SCIENCE

ILMIY JURNAL



Development of science

Ilmiy jurnal

2026/3 VOLUME 6

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Асадова Раъно Дилмуратовна
Тошкент Давлат техника университети доценти

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

ДЕТАНДЕР-ГЕНЕРАТОРНЫЕ УСТАНОВКИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ СИСТЕМ РЕДУЦИРОВАНИЯ ГАЗА

Сотникова Ирина Владимировна
Ташкентский государственный технический университет имени Каримова, доцент
E-mail: irishasot1964@gmail.com
Мукольянц Арсен Артёмович
Ташкентский государственный технический университет имени Каримова, PhD, доцент
E-mail: arsen5675@gmail.com
Эргашева Дильбар Кучкаровна
Ташкентский государственный технический университет имени Каримова, к.т.н., доцент
E-mail: arsen5675@gmail.com

Аннотация. Целью настоящего исследования является повышение эффективности функционирования детандер-генераторных агрегатов, применяемых в энергетических системах редуцирования природного газа, за счёт рационального использования тепловых и энергетических ресурсов. Для достижения поставленной цели выполнен анализ вариантов теплового обеспечения процесса подогрева газа перед его расширением в детандере. В качестве альтернативных источников теплоты рассмотрены автономные котельные установки, а также вторичные энергетические ресурсы в виде дымовых газов газотурбинных установок. Разработан расчётный аппарат, позволяющий определять ключевые эксплуатационные показатели детандер-генераторного агрегата, включая топливный расход, вырабатываемую электрическую мощность и удельные энергетические затраты при различных температурных режимах. Результаты проведённых расчётов свидетельствуют о существенном влиянии температурного уровня подогрева газа на эффективность установки. Установлено, что при относительно низких температурах более рациональным является использование котельных источников теплоты. В то же время при повышенных температурах наибольший эффект достигается при использовании тепла дымовых газов газотурбинных установок, что связано с вовлечением в энергетический баланс вторичных ресурсов. Таким образом, показано, что интеграция детандер-генераторных агрегатов с газотурбинными установками позволяет повысить энергетическую отдачу системы и снизить удельный расход топлива за счёт комплексного использования теплового потенциала.

ISSN 3030-3907

Ключевые слова: природный газ, редуцирование газа, детандер-генераторный агрегат, утилизация тепла, газотурбинная установка, воздушная теплонасосная установка, выработка электроэнергии, коэффициент преобразования, вторичные энергетические ресурсы.

Annotatsiya. Ushbu tadqiqotning maqsadi tabiiy gazni kamaytirishning energetik tizimlarida qo‘llaniladigan detander-generator agregatlarining issiqlik va energetik resurslardan oqilona foydalanish orqali ishlash samaradorligini oshirishdan iborat. Qo‘yilgan maqsadga erishish uchun gazni detanderda kengaytirishdan oldin uni isitish jarayonini issiqlik bilan ta’minlash variantlari tahlil qilindi. Muqobil issiqlik manbalari sifatida avtonom qozon qurilmalari, shuningdek, gaz turbinali qurilmalarning tutun gazlari ko‘rinishidagi ikkilamchi energiya resurslari ko‘rib chiqildi.Amalga oshirilgan hisob-kitoblar natijalari gazni isitishning harorat darajasi o‘rnatish samaradorligiga sezilarli ta’sir ko‘rsatishini tasdiqlaydi. Aniqlanishicha, nisbatan past haroratlarda qozonxona issiqlik manbalaridan foydalanish yanada oqilona hisoblanadi. Shu bilan birga, yuqori haroratlarda gaz turbinali qurilmalarning tutun gazlari issiqligidan foydalanish eng katta samaraga olib keladi, bu esa energiya balansiga ikkilamchi resurslarni jalb etish bilan bog‘liq. Shunday qilib, detander-generator agregatlarining gaz turbinali qurilmalar bilan integratsiyalashuvi issiqlik salohiyatidan kompleks foydalanish hisobiga tizimning energiya samaradorligini oshirish va yoqilg‘ining solishtirma sarfini kamaytirish imkonini berishi ko‘rsatilgan.ander-generator agregatlarining gaz turbinali qurilmalar bilan integratsiyalashuvi issiqlik salohiyatidan kompleks foydalanish hisobiga tizimning energiya samaradorligini oshirish va yoqilg‘ining solishtirma sarfini kamaytirish imkonini berishi ko‘rsatilgan.

Kalit so‘zlar: tabiiy gaz, gazni qayta ishlash, detander-generator qurilmasi, issiqlikni qayta tiklash, gaz turbinali qurilma, havo-issiqlik nasos qurilmasi, elektr energiyasi ishlab chiqarish, o‘zgartirish koeffitsiyenti, ikkilamchi energiya resurslari.

Abstract. The purpose of this study is to increase the efficiency of the expander-generator units used in natural gas reduction energy systems through the rational use of thermal and energy resources. To achieve this goal, an analysis of the options for thermal support of the gas heating process before its expansion in the expander was performed. Autonomous boiler installations, as well as secondary energy resources in the form of flue gases from gas turbine installations, are considered as alternative sources of heat. A calculation apparatus has been developed that allows determining the key operational parameters of an expander-generator unit, including fuel consumption, generated electrical power and specific energy costs under various temperature conditions. The results of the calculations indicate a

ISSN 3030-3907

significant influence of the temperature level of gas heating on the efficiency of the installation. It has been established that at relatively low temperatures, it is more rational to use boiler heat sources. At the same time, at elevated temperatures, the greatest effect is achieved when using the heat of flue gases from gas turbine installations, which is associated with the involvement of secondary resources in the energy balance. Thus, it is shown that the integration of expander-generating units with gas turbine installations makes it possible to increase the energy efficiency of the system and reduce specific fuel consumption due to the integrated use of thermal potential.

Keywords: natural gas, gas reduction, expander generator set, heat recovery, gas turbine unit, air-heat pump unit, power generation, conversion coefficient, secondary energy resources.

ВВЕДЕНИЕ.

Электроэнергетический сектор Республики Узбекистан занимает системообразующее положение в национальной экономике, обеспечивая функционирование промышленности, социальной инфраструктуры и коммунального хозяйства. Обладая значительным производственным и научно-техническим потенциалом, энергетическая отрасль оказывает определяющее влияние на темпы и устойчивость экономического развития. Единая энергосистема страны обеспечивает покрытие потребностей потребителей в электрической энергии, при этом Узбекистан выступает в качестве одного из ключевых энергетических узлов Центральноазиатского региона.

В условиях возрастающих требований к энергоэффективности и рациональному использованию топливно-энергетических ресурсов особую актуальность приобретают технологии, основанные на утилизации избыточных энергетических потенциалов. К числу таких решений относятся детандер-генераторные установки (ДГУ), применение которых в сочетании с теплонасосными системами позволяет формировать интегрированные энерготехнологические комплексы с повышенными показателями эффективности. Существенным преимуществом данных систем является возможность генерации электрической энергии без дополнительного сжигания топлива, что соответствует современным тенденциям ресурсосбережения.

Эффективность функционирования детандер-генераторных установок в значительной степени определяется температурным уровнем газа на входе в детандер. В соответствии с нормативными требованиями эксплуатации магистральных газопроводов, перед процессом расширения газ подлежит

ISSN 3030-3907

предварительному подогреву до температур порядка 80–100 °C. Традиционно указанный подогрев осуществляется за счёт тепловой энергии, получаемой при сжигании топлива. Вместе с тем, альтернативным направлением является использование вторичных энергетических ресурсов, в частности тепла уходящих газов газотурбинных установок, что позволяет отказаться от прямого сжигания топлива и повысить общую энергетическую эффективность системы [1–4].

При выполнении исследований получено следующее:

– обоснована целесообразность выбора источника тепловой энергии для подогрева природного газа в детандер-генераторных агрегатах с учётом температурных режимов их эксплуатации;

– разработаны расчётные зависимости для определения основных эксплуатационных показателей детандер-генераторных агрегатов, включая мощность, расход топлива и удельные энергетические характеристики, с учётом различных вариантов теплового обеспечения;

– выявлены закономерности влияния температуры подогрева газа на энергетическую эффективность работы детандер-генераторных установок;

– установлено преимущество использования вторичных энергетических ресурсов в виде дымовых газов газотурбинных установок при повышенных температурных уровнях, обеспечивающее рост мощности и снижение удельного расхода топлива [5].

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ.

В рамках настоящего исследования выполнен сравнительный анализ источников тепловой энергии, применяемых для подогрева природного газа перед его подачей в детандер-генераторный агрегат. Для условий Республики Узбекистан к числу наиболее технологически реализуемых решений относятся использование специализированных котельных установок (рис. 1), а также утилизация теплового потенциала дымовых газов газотурбинных установок [6, 7].

ISSN 3030-3907

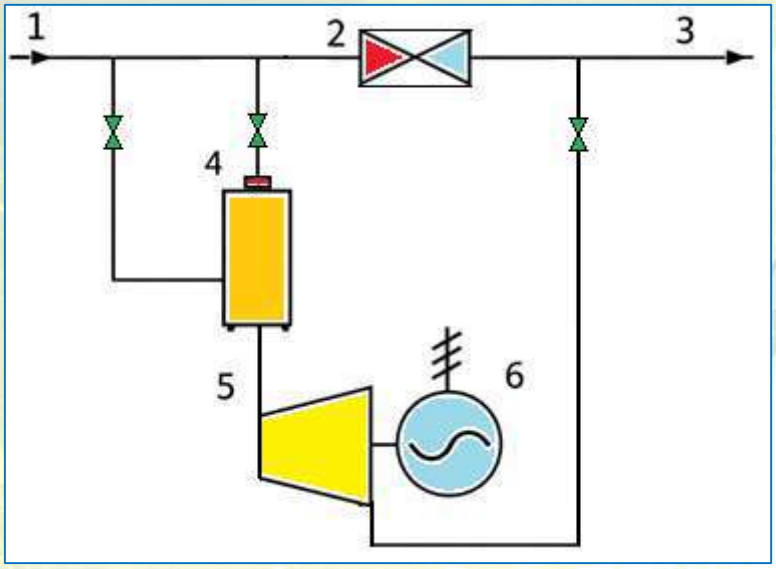


Рис. 1. ДГА с подогревом газа в котле:
1-трубопровод высокого давления;2-дроссельное устройство;
3- трубопровод низкого давления; 4- котел; 5- детандер; 6-генератор

В системах подогрева природного газа в качестве теплоносителей могут использоваться дымовые газы, сетевая вода либо отработанные газы газотурбинных установок. При функционировании детандер-генераторных агрегатов расход газа, поступающего на оборудование, определяется его тепловым содержанием и находится в зависимости от изменения энтальпии газа в процессе подготовки.

Энергетическое соотношение, характеризующее тепловое состояние газового потока при подогреве, может быть представлено в следующем виде:

$$Q_{\text{ртг}} = Q_{\text{нтс}} + h_{\text{г}} - h_0$$

В приведённом выражении $Q_{\text{ртп}}$ представляет собой удельную теплоту, подводимую к газу в процессе его подготовки; $Q_{\text{нтс}}$ — низшую теплоту сгорания топлива, характеризующую химический энергетический потенциал топлива. Величины $h_{\text{г}}, h_0$ соответствуют удельной энтальпии газа при текущих термодинамических параметрах (температура и давление) и при стандартных условиях (температура 273 К и давление 0,1 МПа) соответственно.

Разность энтальпий ($h_{\text{г}}$ - h_0) отражает изменение внутренней энергии газового потока в процессе подогрева и определяет дополнительную тепловую нагрузку, необходимую для достижения требуемого температурного уровня перед расширением в детандере.

Таким образом, данное соотношение позволяет установить взаимосвязь между химической энергией топлива и термодинамическими

ISSN 3030-3907

параметрами газового потока, что является основой для расчёта тепловых и энергетических характеристик детандер-генераторных установок.

При допущении термодинамического равновесия, в рамках которого энтальпия газа на выходе из детандера принимается равной энтальпии газа на входе в последующие элементы системы, основные энергетические характеристики детандер-генераторного агрегата могут быть определены на основе следующих зависимостей.

Мощность, развиваемая детандером, определяется выражением:

$$N_{\text{ДГА}} = G_{\text{топ}} \cdot (h_1 - h_2) \quad (1)$$

где $G_{\text{топ}}$ - массовый расход газа;

h_1 и h_2 - удельные энтальпии газа соответственно на входе и выходе из детандера.

Расход топлива, необходимый для обеспечения требуемого температурного уровня подогрева газа, определяется с учётом энергетических характеристик топлива и эффективности теплогенерирующего оборудования:

$$\text{V}G_{\text{топ}}^{\text{пер}} = \frac{G_{\text{топ}} \cdot (h_1 - h_2)}{Q_{\text{нтс}} \cdot \eta_{\text{к}}}, \quad (2)$$

где $\eta_{\text{к}}$— коэффициент полезного действия котельной установки или иного источника теплоты.

Удельный расход топлива при производстве электрической энергии детандер-генераторной установкой определяется как:

$$G_{\text{урт}} = \frac{1}{Q_{\text{нтс}} \cdot \eta_{\text{к}}}, \quad (3)$$

Что позволяет оценить топливную эффективность установки в зависимости от характеристик используемого топлива и теплотехнических параметров системы подогрева.

Таким образом, представленные зависимости формируют основу для количественной оценки энергетической эффективности детандер-генераторных агрегатов при различных режимах эксплуатации и вариантах теплового обеспечения.

В приведённых соотношениях коэффициент $\eta_{\text{к}}$ характеризует эффективность котельной установки, обеспечивающей предварительный подогрев газа перед его поступлением в детандер. Величина $G_{\text{топ}}$ соответствует расходу газа в трубопроводе, а параметры h_1 и h_2 определяют значения удельной энтальпии газа соответственно до и после процесса расширения.

ISSN 3030-3907

В общем случае, при отсутствии равенства энтальпий газа на выходе из детандера и на входе в газопотребляющую систему, $h_{\text{ВХ}} \neq h_2$, изменение термодинамического состояния газа сопровождается перераспределением его расхода. Данный эффект особенно проявляется при использовании части газа в качестве топлива. В этих условиях расчётные зависимости для определения основных характеристик установки принимают уточнённый вид.

Расход топлива, необходимый для подогрева газа в котельной установке, определяется выражением:

$$V G_{\text{топ}}^{\text{под}} = \frac{G_{\text{топ}} \cdot (h_1 - h_{\text{ВХ}})}{(Q_{\text{нтс}} + h_2 - h_{\text{ВХ}}) \cdot \eta_{\text{к}}}; \qquad (4)$$

Мощность детандер-генераторного агрегата с учётом изменения энтальпии газа на входе в систему может быть представлена в виде:

$$N_{\text{ДГА}} = G_{\text{топ}} \cdot \frac{Q_{\text{нтс}} + h_{\text{ВХ}} - h_0}{Q_{\text{нтс}} + h_2 - h_0} \cdot (h_1 - h_2); \qquad (5)$$

Удельный расход топлива на выработку электрической энергии, с учётом перераспределения газового потока, определяется следующим образом:

$$G_{\text{урт}} = \frac{V G_{\text{топ}}}{N_{\text{ДГА}}} = \frac{1}{(Q_{\text{нтс}} + h_2 - h_0) \cdot \eta_{\text{к}}} \cdot \frac{(h_1 - h_{\text{ВХ}})}{(h_1 - h_2)} \cdot \left[1 + \frac{(h_{\text{ВХ}} - h_2) \cdot \eta_{\text{к}}}{(h_1 - h_{\text{ВХ}})}\right]. \qquad (6)$$

Полученные зависимости позволяют учитывать влияние изменения термодинамического состояния газа на входе в газопотребляющую систему на энергетические показатели детандер-генераторной установки.

Удельный расход топлива на выработку электрической энергии, при условии отнесения полного изменения расхода топлива к процессу генерации, определяется выражением (6).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ.

Проведённые расчётные исследования показали, что энергетические и топливные характеристики детандер-генераторных установок в значительной степени определяются температурным уровнем подогрева газа, а также выбором источника тепловой энергии.

Анализ зависимостей, представленных на рис. 2, свидетельствует о том, что с увеличением температуры подогрева газа наблюдается рост удельного расхода топлива.

ISSN 3030-3907

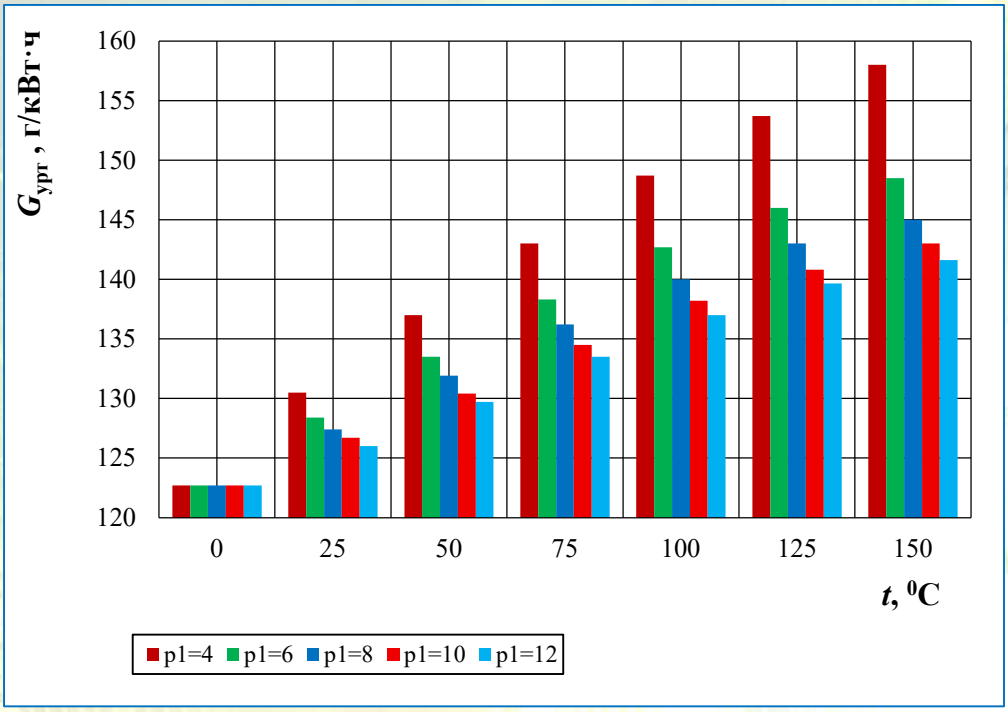


Рис. 2. Удельный расход топлива при выработке электроэнергии

Данная тенденция обусловлена увеличением тепловых затрат на подготовку газа, несмотря на одновременное повышение мощности детандера. При этом влияние давления газа проявляется в изменении перепада энтальпии: при более высоких давлениях увеличивается потенциальная работа расширения, однако это сопровождается ростом топливных затрат на подогрев.

Использование дымовых газов газотурбинной установки (рис. 3) позволяет существенно изменить энергетический баланс системы.

В данном случае подвод теплоты осуществляется за счёт утилизации вторичных энергетических ресурсов, что снижает потребность в дополнительном сжигании топлива. В этом случае суммарное количество теплоты, передаваемой дымовыми газами, может быть представлено в виде:

$$Q_{\text{дг}} = N_{\text{ДГА}} + Q_{\text{уг}}, \qquad (7)$$

где: $N_{\text{ДГА}}$ - мощность ДГА; $Q_{\text{уг}}$ - теплота уходящих газов.

ISSN 3030-3907

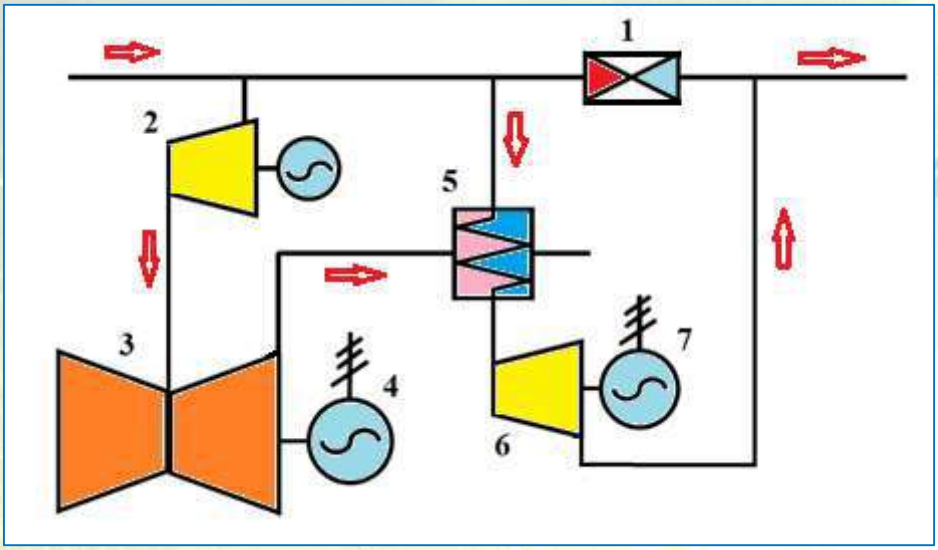


Рис. 3. Подогрев газа уходящими газами ГТУ
1-дроссельное устройство; 2- компрессор; 3- газотурбинная установка (ГТУ); 4 - генератор ГТУ; 5 - теплообменник; 6 - детандер; 7- генератор ДГА

Мощность газотурбинной установки, обеспечивающей формирование соответствующего теплового потока, определяется соотношением:

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

где $\eta_{\text{ГТУ}}$ – коэффициент полезного действия газотурбинной установки;

$t_{\text{дг}}$, $t_{\text{вх}}$, $t_{\text{уг}}$ — температурные параметры дымовых газов на различных участках системы.

Таким образом, использование тепла уходящих газов газотурбинных установок позволяет сформировать замкнутую энерготехнологическую схему, в которой обеспечивается более полное использование энергетического потенциала топлива и повышение общей эффективности установки.

Удельный расход топлива при выработке электрической энергии в рассматриваемой комбинированной схеме определяется следующим образом:

$$G_{\text{урт}} = \frac{1}{\left(Q_{\text{нтс}} + h_{\text{ВХ}} - h_0\right)} \cdot \left(\frac{t_{\text{дг}} - t_{\text{вх}}}{t_{\text{дг}} - t_{\text{уг}}} \cdot \frac{\eta_{\text{ГТУ}}}{1 - \eta_{\text{ГТУ}}} \cdot \frac{h_{\text{ВХ}} - h_2}{h_1 - h_{\text{ВХ}}} \right), \quad (8)$$

Полученные расчётные зависимости позволяют учитывать совместное влияние термодинамических параметров газа и характеристик газотурбинной установки на топливную эффективность процесса генерации электроэнергии.

Результаты расчётов удельного расхода топлива, выполненные по выражению (8), в зависимости от температуры подогрева газа представлены

ISSN 3030-3907

на рис. 4. Анализ графических зависимостей показывает, что с увеличением температуры газа перед детандером наблюдается устойчивая тенденция изменения топливной эффективности установки, причём характер кривых определяется значениями давления газа.

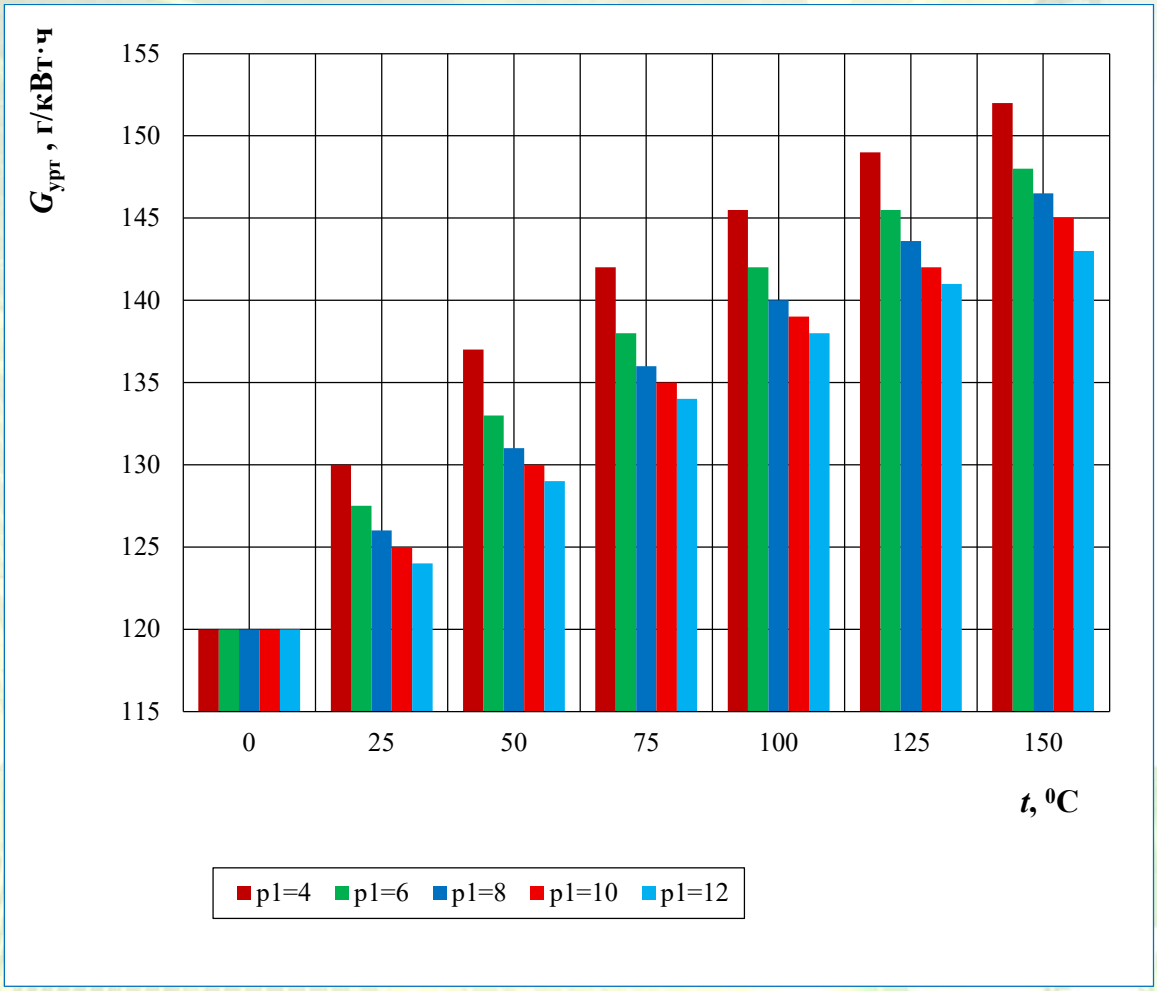


Рис. 4. Изменение удельного расхода топлива при росте температуры газа перед детандером

В случае, если изменение энтальпии газа на выходе из детандера не оказывает влияния на расход газа, поступающего к потребителю, расчётные зависимости для основных энергетических показателей могут быть представлены в упрощённой форме.

Расход топлива определяется следующим выражением:

$$\Delta G_{\text{топ}} = G_{\text{ГТУ}} = G_{\text{топ}} \cdot \frac{(h_1 - h_{\text{ВХ}})}{(Q_{\text{нтс}} + h_{\text{ВХ}} - h_0)} \cdot \frac{t_{\text{дг}} - t_{\text{хв}}}{t_{\text{дг}} - t_{\text{уг}}} \cdot \frac{1}{1 - \eta_{\text{ГТУ}}}; \quad (9)$$

Электрическая мощность установки определяется соотношением:

$$N_{\text{УСТ}} = G_{\text{топ}} \cdot (h_1 - h_2) \cdot \left(\frac{t_{\text{дг}} - t_{\text{хв}}}{t_{\text{дг}} - t_{\text{уг}}} \cdot \frac{\eta_{\text{ГТУ}}}{1 - \eta_{\text{ГТУ}}} \cdot \frac{(h_1 - h_{\text{ВХ}})}{(h_1 - h_2)} + 1 \right); \quad (10)$$

Удельный расход топлива на выработку электрической энергии в рассматриваемом случае определяется выражением:

ISSN 3030-3907

$$G_{\text{урт}} = \frac{1}{\left(Q_{\text{нтс}} + h_{\text{ВХ}} - h_0\right)} \cdot \frac{\left(\frac{t_{\text{дг}} - t_{\text{хв}}}{t_{\text{дг}} - t_{\text{уг}}} \cdot \frac{1}{1-\eta_{\text{ГТУ}}}\right)}{\left(\frac{t_{\text{дг}} - t_{\text{хв}}}{t_{\text{дг}} - t_{\text{уг}}} \cdot \frac{\eta_{\text{ГТУ}}}{1-\eta_{\text{ГТУ}}} + \frac{\left(h_1 - h_2\right)}{\left(h_1 - h_{\text{ВХ}}\right)}\right)}. \quad (11)$$

Проведённый анализ показывает, что повышение температуры подогрева газа приводит к увеличению эффективности использования теплового потенциала дымовых газов газотурбинной установки. Это, в свою очередь, обеспечивает снижение удельного расхода топлива по сравнению с традиционными схемами, основанными на применении котельных установок.

Таким образом, использование вторичных энергетических ресурсов в виде уходящих газов ГТУ позволяет реализовать более эффективные режимы работы детандер-генераторных установок, особенно в условиях повышенных температур подогрева газа [8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Проведённое исследование позволило комплексно оценить влияние способов подогрева природного газа на энергетические и топливные характеристики детандер-генераторных установок, функционирующих в составе энергетических систем редуцирования газа. Полученные результаты подтверждают определяющую роль температурных и термодинамических параметров газа в формировании эффективности работы установки.

Установлено, что при относительно низких температурах подогрева газа (до ~80 °C) применение специализированных котельных установок обеспечивает более стабильные и управляемые условия теплообмена, что обуславливает их целесообразность в указанных режимах эксплуатации. Вместе с тем, по мере повышения температуры подогрева эффективность традиционных схем снижается вследствие роста удельных топливных затрат.

Показано, что использование теплового потенциала дымовых газов газотурбинных установок позволяет реализовать более эффективные режимы работы детандер-генераторных агрегатов за счёт вовлечения вторичных энергетических ресурсов. При этом достигается увеличение генерируемой мощности и снижение удельного расхода топлива, что свидетельствует о повышении общей энергетической эффективности системы.

На основе разработанных расчётных зависимостей установлены закономерности изменения удельного расхода топлива и мощности установки в зависимости от температурных режимов и параметров газового

ISSN 3030-3907

потока. Полученные результаты позволяют обосновать выбор рациональной схемы подогрева газа с учётом конкретных условий эксплуатации.

Доказано, что интеграция детандер-генераторных установок с газотурбинными установками формирует энерготехнологические комплексы с повышенным уровнем использования топливно-энергетических ресурсов. Такая интеграция обеспечивает переход к более эффективным и ресурсосберегающим схемам энергоснабжения.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения полученных зависимостей и рекомендаций при проектировании и модернизации газораспределительных и энергетических объектов, а также при выборе оптимальных режимов работы детандер-генераторных установок.

Таким образом, результаты исследования подтверждают перспективность широкого внедрения детандер-генераторных технологий в сочетании с утилизацией вторичных энергетических ресурсов для повышения энергоэффективности и устойчивости энергетической инфраструктуры Республики Узбекистан.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мукольянц А.А., Сотникова И.В., Турсунова Э.А. Расчетный анализ эффективности использования детандер-генераторной установки на Ташкентской ТЭЦ // Журнал «Проблемы энерго- и ресурсосбережения». - Ташкент, № 89, 2025. – С. 54-63.
2. Агабабов В.С., Андреев А.Р. Изменение показателей котельных при применении детандер – генераторных агрегатов // Промышленная энергетика. 2004. №7. С. 38–44.
3. Андреев А.Р. Изменение показателей работы котельных при применении ДГА с подогревом газа дымовыми газами ГТУ // Промышленная энергетика. 2005. №1. С. 42–44.
4. Оценка показателей детандер - генераторных агрегатов, установленных на ГРС и ГРП // Корягин А.В. /Энергосбережение и водоподготовка. -2004. -№1. -С.71-74.
5. Сотникова И.В., Мукольянц А.А., Низомов Ж. О влияние детандр-генераторного агрегата на эффективность работы котельных при подогреве газа дымовыми газами газотурбинной установки // Журнал «Проблемы энерго- и ресурсосбережения». - Ташкент, № 85, 2024. – С. 168-174.

ISSN 3030-3907

6. 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.

7. Белоусов, А. Е. Моделирование газодинамических процессов, связанных с утилизацией энергии природного газа на малых пунктах редуцирования единой системы газоснабжения при помощи регулируемого детандер-генератора объемного типа / А. Е. Белоусов, О. В. Кабанов, Г. Х. Самигуллин. – Текст: непосредственный // Территория Нефтегаз. – 2017. – № 7–8. – С. 18–23.

8. Энергосбережение в котельных установках ТЭС при использовании вторичных энергоресурсов / И.В. Сотникова, А.А. Мукольянц // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. – 2022. - № 3. - С. 271-277.

ISSN 3030-3907