

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 551.46.09.

Ексергетичний аналіз процесів енергозбереження в газотранспортній системі

В. М. Ярошенко

Одеська національна академія харчових технологій, вул. Дворянська, 1/3, Одеса, 65082, Україна

✉ e-mail: valeryi@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6051-6848>

Впровадження технологій енергозбереження в газотранспортній системі при альтернативній заміні енергетично неефективного процесу зниження тиску газу в дросельно-редукційних установках на його адіабатичне розширення в турбодетандерних агрегатах з виробництвом електричної енергії дозволяє суттєво зменшити ексергетичні втрати. Утилізація надлишкового тиску природного газу в утилізаційних турбодетандерних агрегатах (УТДА) може ефективно використовуватись для генерації електричної енергії, виробництва холоду та скраплення природного газу на компресорних станціях в системі транспорту, розподілу та споживання газу. Застосування ексергетичного методу при термодинамічному аналізі УТДА дозволяє враховувати, так звані, транзитні потоки ексергії, розраховувати кількісні та якісні характеристики енергетичних перетворювань з визначенням їх рівня необоротності в абсолютних та відносних показниках. Проведені розрахунки ексергетичних характеристик одноцільового та когенераційного турбодетандерних агрегатів показують, що ексергетичний ККД одноцільового електрогенеруючого УТДА з підігрівом є вищий по відношенню до когенераційної схеми без попереднього підігріву газу, що обумовлюється суттєвим впливом температури підігріву газу на електричну потужність по відношенню до ексергії теплоти підігріву. Порівняння ексергетичних показників одноцільових УТДА з підігрівом газу до та після детандеру показує, що установки з підігрівом перед детандером є більш ефективними, незважаючи на те, що підігрів після розширення, в принципі, може здійснюватись за рахунок теплової енергії навколишнього середовища. Загалом практична доцільність енергозбереження на основі УТДА визначається на основі мінімальних суспільно-необхідних витрат, які включають усі види затрат, які пов'язані з практичним впровадженням агрегатів та їх експлуатацією.

Ключові слова: Енергозбереження; Газотранспортна система; Утилізація; Електрогенерація; Підігрів; Ексергія; Енергетична ефективність

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v58i1.2314>

© The Author(s) 2022. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

1. Вступ

Одним із актуальних та першочергових завдань ефективного розвитку України являється проблема енергозбереження як при виробництві так і при використанні енергетичних потоків різної якості.

Первинні природні енергетичні ресурси, і в першу чергу, природний газ, займають провідне, а

інколи і визначальне місце в енергетичних системах більшості країн, незважаючи на високі темпи впровадження альтернативних та відновлювальних енергетичних джерел [6,7].

Ефективність та техніко-економічна доцільність газотранспортної системи при технологічній підготовці, транспорті та споживанні газу може бути суттєво підвищена при впровадженні сучасних технологій енергозбереження. В першу чергу

це відноситься до утилізації потенційної енергії природного газу при зниженні його тиску в редуційно-дросельних установках (РДУ) систем технологічної підготовки, транспорту, розподілу та споживання газу, у тому числі, і при використанні його в якості палива газотурбінних установок на компресорних станціях.

Як відомо, процеси розподілу та споживання природного газу супроводжуються значним зниженням тиску в магістральних трубопроводах до тиску споживання, який залежить від технологічних особливостей технологій споживачів. Природний газ, основу якого складає метан, транспортується по магістральних трубопроводах при тисках 4,5-7,5 МПа, що визначається вимогами до їх пропускної спроможності, а тиск в процесах його практичного споживання є значно нижчим. Тому перед подаванням газу із магістрального газопроводу до споживача тиск проходить кілька етапів зниження на газорозподільних станціях (ГРС) та газорозподільних пунктах (ГРП). Наприклад, на більшості ГРС його знижують від 4,5-7,5 до 1,2-1,6 МПа, а на ГРП від 1,2-1,6 до 0,15-0,3 МПа [2,14].

При традиційній (існуючій) системі газопостачання тиск газу знижується в простих, з технічної точки зору, РДУ з втратою потенційної енергії. При цьому практично не змінюється ентальпія природного газу, але втрачається його технічна робото спроможність (ексергія), так як процес адіабатичного дроселювання являється необоротним та супроводжується високим рівнем деградації енергії.

На сьогоднішній день проблема утилізації потенційної енергії редуційного природного газу являється одним із важливих елементів підвищення енергоефективності системи енергопостачання, проте мало використовуваним резервом вторинних енергоресурсів на об'єктах газової промисловості.

Практичне широкоформатне впровадження УТДУ в Україні стримується певними факторами, основними з яких є те, що це більш складні, з технічної точки зору системи, і тому їх впровадження обумовлює більш значні капітальні витрати, які пов'язані з їх вартістю. До того ж ТДА являються енергетичним обладнанням, що потребує постійної присутності кваліфікованого обслуговуючого персоналу та допоміжних експлуатаційних витрат.

За експертними оцінками при впровадженні технологій енергозбереження на газоперекачувальних (ГПС) і газорозподільних (ГРС) компресор-

них (КС) станціях країни, можливо отримувати біля 480 МВт генеруючих потужностей, які щорічно будуть виробляти 28 млрд. кВт електроенергії [5,7].

2. Аналіз процесів утилізації енергії газу при технологічному зниженні його тиску

В системі трубопровідного транспорту природного газу мають місце декілька процесів, пов'язаних із зниженням тиску та втратою потенційної енергії газу в редуційно-дросельних пристроях. Зниження тиску, насамперед, обумовлюється технологічними вимогами при розподілі природного газу та його споживанні, що реалізується на наступних складових технологічних етапах газотранспортної системи [2,13]:

- на компресорних станціях для підготовки та очищення природного газу від водяної пари та домішок перед його транспортуванням або споживанням;
- на газорозподільних станціях та газорозподільних пунктах при технологічному зниженні тиску газу;
- на компресорних станціях при використанні газу в якості палива газотурбінних установок;
- на газорозподільних станціях при скрапленні природного газу;
- при споживанні газу в якості палива на теплових електричних станціях та котельних системах.

Вперше використовувати перепад тиску природного газу на ГРС (ГРП) для вироблення електроенергії за допомогою турбодетандерів було запропоновано та експериментально перевірено на турбодетандерній установці ГРП Дашавського сажового заводу в середині минулого століття [5,14]. Подальші дослідження та розвиток ТДА показали доцільність їх впровадження в газотранспортній системі, незважаючи на ряд обмежувальних негативних факторів, пов'язаних з високою вартістю турбодетандерних установок та відповідними експлуатаційними складнощами, які обумовлюються суттєвим зниженням температури після його розширення в детандері.

На даний час в багатьох країнах у тому числі і на Україні використовується достатньо велика кількість ТДА, але в переважній більшості в технологіях низькотемпературної очистки газів від різних домішок [10].

Слід зазначити, що виробництво електроенергії допомогою турбодетандерів – це енерго-

ефективна та екологічно чиста технологія, завдяки відсутності шкідливого впливу на навколишнє середовище, оскільки при цьому не спалюється органічне паливо та не викидаються шкідливі речовини у повітря. Позитивним фактором при виробництві електричної енергії в турбодетандерних установках є часткова компенсація пікових навантажень на електричну мережу, оскільки споживання природного газу в пікові періоди також зростає [8].

Проведені дослідження показали, що зниження тиску природного газу в детандерах супроводжується суттєвим зниженням його температури, що обумовлює утворення кристалогідратів, обмерзання трубопроводів, ґрунту, що може призвести до їх деформації і руйнування. Наприклад, при використанні детандерного процесу перепад температур між його входом та виходом може зростати у 5-8 разів по відношенню до дроселювання. При цьому суттєво ускладнюються конструктивні схеми установок, підвищуються вимоги до їх експлуатації та зростають економічні витрати [9].

Для запобігання негативних явищ, пов'язаних з низькими температурами газу, у більшості електростанцій УТДУ, в залежності від їх призначення, технологічних особливостей, ступеня осушування, складу газу і ступеня зниження тиску застосовується підігрів газу перед або після розширення в турбодетандері.

Переважаюча кількість УТДА використовується для виробництва електричної енергії, тобто турбодетандери застосовуються для безпосереднього приводу електрогенераторів. В залежності від призначення та потужності технологічного вузла, електрична потужність електрогенераторів може змінюватись від десятків до тисяч кіловат [2]. Типові схеми установок з ТДА для виробництва виключно електроенергії, які є найбільш поширеними на ГРС та ГРП, показані на рис. 1.

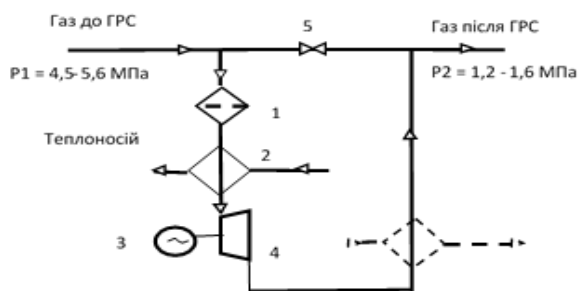


Рисунок 1 – Схема одноцильового електрогенеруючого УТДА: 1 – фільтр; 2 – теплообмінник; 3 – електрогенератор; 4 – турбодетандер; 5 – редукційний (дросельний) клапан ГРС.

На практиці застосовуються установки з підігрівом газу перед детандером так і після його розширення. Вибір способу підігріву газу та теплоносія залежить від багатьох складових і тому являється категорією техніко-економічною. На схемі рис.1 умовно пунктиром показано варіант установки з підігрівом газу після його розширення в детандері.

З енергетичної точки зору більш доцільним є підігрів газу перед ТДА, так як при цьому підвищується питома робота детандера, знижуються показники установки по шкідливим викидам оксидів азоту та вуглецю та по шумовому впливу на навколишнє середовище. Традиційно підігрів газу на 60-100 °С і більше здійснюється проміжним теплоносієм (водою, парою і т.п.) у спеціальних теплообмінниках-підігрівачах. Гарячий теплоносій при цьому, як правило, одержує тепло від зовнішніх джерел (парових котлів, теплових мереж і т.д.). Зазвичай, такий підігрів відбувається при вимогах, коли температури газу після його розширення в турбодетандері (на вході до споживача газу) повинні бути на рівні 0-2 °С. Помірної температури, як правило, вимагають і споживачі газу на побутовому рівні – енергетичні котли і т.д.

Застосування підігріву пов'язано з допоміжними витратами теплової енергії, яка може складати 20-30% загальної потужності установки, при затратах теплоти в рамках 1,15-1,2 кВт·год на 1 кВт·год додаткової електричної енергії, що обумовлює додаткову витрату паливного газу. Дослідження показують, що витрата паливного газу при цьому у 7-11 разів більша по відношенню до схем з дросельними процесами в РДУ[1].

Для підвищення енергетичних показників установок необхідно застосовувати енергетичні джерела, які базуються на впровадженні рекуперативних процесів, використанні вторинних і скидних енергетичних та інших джерел теплоти.

Утилізаційні турбодетандерні агрегати можуть використовуватись як одноцильові для виробництва електричної енергії так і комбіновані (когенераційні) для спільного виробництва електроенергії і холоду. Особливістю таких когенераційних установок є те, що низькотемпературний потік детандерного газу підвищує температуру в холодильній системі і при цьому відпадає необхідність в спеціальній системі підігріву газу перед основним споживачем.

Конструктивні та технологічні особливості УТДА визначаються насамперед, їх практичною

необхідністю та техніко-економічною доцільністю, що залежить від особливостей технологічних параметрів при зниженні тиску газу, територіального розміщення ГРС (РГП), наявності споживачів холоду і т.д.

На рис.2 показана схема когенераційної турбодетандерної установки, в якій процес зниження тиску природного газу, як головного завдання ГРС (ГРП), супроводжується, виробництвом електричної енергії та низькотемпературного потоку природного газу, який використовується для холодопостачання.

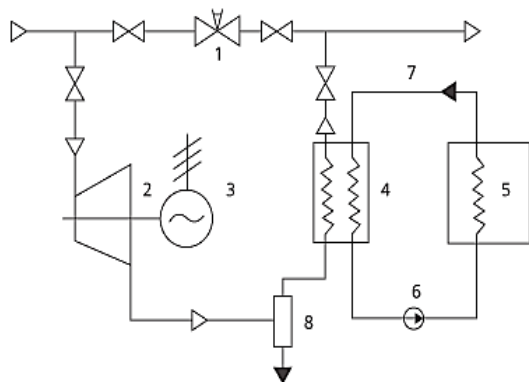


Рисунок 2 – Схема ТДА з виробництвом холоду:

- 1 – редукційний клапан ГРС дросельний клапан;
- 2 – турбодетандер; 3 – електрогенератор;
- 4 – теплообмінник (підігрівач газу – охолоджувач холодоносія); 5 – холодильна камера;
- 6 – циркуляційний насос; 7 – контур розчину солі (холодоносія); 8 – сепаратор

УТДА можуть застосовуватись на ГРС (ГРП) для одержання як помірно низьких температур, так і температур, необхідних, наприклад, для зрідження природного газу [12].

При цьому після турбодетандеру розміщується споживач холоду, і тому газ охолоджується при розширенні до необхідної мінусової температури, яка залежить від технологічних особливостей холодильної технології.

Розрахунки показують, що при зниженні тиску газу з 5,2 до 1,2 МПа його температура знижується на 50-60 °С (залежно від складу газу та ефективності детандера). При збільшенні рівня зниження тиску від 7,5 до 1,2 МПа різниця температур зростає до 70-80 °С. Якщо прийняти, що температура газу на вході в машину дорівнює 20 °С, температура потоку після розширення становитиме -30...-40 °С у першому та -50...-60 °С у другому випадку [9].

Когенераційна установка, принципова схема якої показана на рис.3, може застосовуватись для одночасного виробництва електричної енергії та для скраплення природного газу на невеликих ГРС. Характерними особливостями цієї системи являються застосування теплообмінника для охолодження газу перед турбодетандером холодним зворотним потоком газу (рекуперативного теплообмінника) і дотискувального компресора.

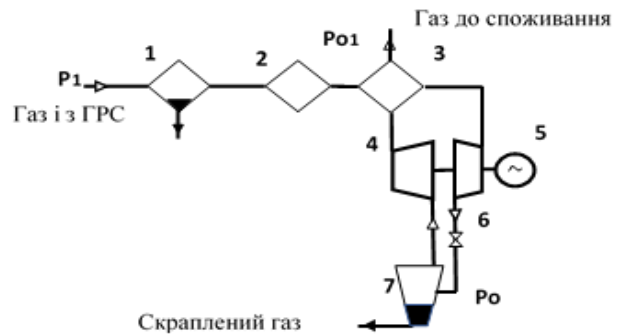


Рисунок 3 – Схема ТДА для зрідження газу:

- 1 – фільтри; 2 – лічильник природного газу;
- 3 – теплообмінник-підігрівач газу;
- 4 – турбодетандер; 5 – електрогенератор;
- 6 – турбокомпресор; 7 – сепаратор

Турбодетандерна установка підключається паралельно редукційно-дросельному пристрою ГРС або ГРП. Для синхронізації частоти обертання турбодетандера, яка суттєво перевищує частоту обертання електрогенератора застосовуються редуктори. Основний потік природного газу після розширення в детандері 6 та наступному дроселюванні скраплюється. Рідинна фракція газу акумулюється в сепараторі 7, а газова всмоктується компресором 4 та через регенеративний теплообмінник 3 направляється на споживання. За опублікованими даними, у такий спосіб зріджується до 5 % від загальної витрати газу [12].

Особливої уваги заслуговують утилізаційні технології при використанні природного газу в якості палива газотурбінних установок які широко використовуються в якості силових установок нагнітачів природного газу. При цьому споживання газу складає близько 10 % від кількості газу, що транспортується.

На рис. 4 приводиться схема газоперекачувального агрегату з утилізацією потенційної енергії природного газу, який використовується в якості паливного в газотурбінній установці. Природний

газ який подається до камер згоряння газотурбінних установок при тисках, які перевищують тиск повітря всього на 4-5 кг/см².

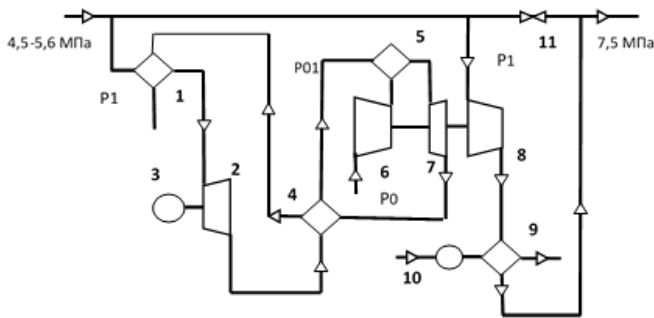


Рисунок 4 – Технологічна схема газоперекачувального агрегату з утилізацією потенційної енергії газу: 1 – рекуперативний підігрівач газу; 2 – турбодетандер; 3 – електрогенератор; 4 – рекуперативний теплообмінний апарат ГТУ; 5 – камера згоряння ГТУ; 6 – турбокомпресор ГТУ; 7 – турбіна ГТУ; 8 – компресор (нагнітач) природного газу; 9 – АВО (охолоджувач); 10 – вентиляторна система; 11 – дрельно-редукційний клапан.

При цьому проста з технічної точки зору система зниження тиску паливного газу в редукційно-дрельній установці замінюється установкою розширення газу в турбодетандері з виробництвом електричної енергії. Така система дозволяє утилізувати потенційну енергію стисненого газу при зниженні тиску від 5,2 до 1,8 МПа, що обумовлює підвищення загальної техніко-економічної ефективності [2]. Такі установки знаходять саме застосування на різних за призначенням компресорних станціях газотранспортної системи.

Джерелом зовнішньої енергії нагнітача природного газу являється газотурбінна установка, яка складається із силової турбіни 7, турбокомпресору 6, камери згоряння 5 та регенеративного теплообмінника 4. Підігрів газів перед їх розширенням в утилізаційному турбодетандері здійснюється в теплообміннику 1 за рахунок теплоти відпрацьованих в турбіні газів, які попередньо проходять через регенеративний підігрівач 4, підвищуючи температуру газу перед камерою згоряння ГТУ.

В залежності від потужності та характеристик ГТУ на компресорних станціях газотранспортної системи також застосовуються допоміжні підігрівачі газу перед турбодетандером та камерою згоряння за рахунок спалювання деякої кількості природного газу.

3. Ексергетичне дослідження процесів енергозбереження в УТДА

Як правило, практична доцільність впровадження будь-яких засобів енергозбереження, у тому числі застосування нетрадиційних та відновлювальних енергетичних джерел або утилізації вторинних енергетичних потоків, завжди вирішується на основі мінімальних суспільно необхідних затрат. При цьому енергетична (термодинамічна) складова в системі загальних приведених витрат завжди являється провідною, а інколи, і визначальною при аналізі та впровадженні енерготехнологічних установок та систем [3].

Науково обґрунтований аналіз всієї послідовності енергетичних перетворень в системі транспорту газу суттєво важливий для успішного проведення активної енергозберігаючої політики. Цей аналіз повинен починатися від первинних енергоресурсів, а завершатися на стадії використання вторинних ресурсів та відходів з врахуванням екологічних впливів. Базою для такого аналізу обмеження, на основі першого та другого законів термодинаміки [4].

Нижче приводиться термодинамічний аналіз когенераційних (рис. 2) та простих електрогенеруючих УТДУ (рис. 3) з метою визначення їх енергетичних показників та порівняння рівня їх енергетичної ефективності.

На рис.5 в T,S -діаграмі показані термодинамічні процеси в УТДА при умові, що природний газ відповідає моделі ідеального газу.

Процеси 1-1s-3s відповідають установці з підігрівом газу перед детандером при умові, що кінцева температура відповідає температурі зовнішнього середовища T_0 , а процеси 1-3-3s відповідають когенераційній установці з виробництвом холоду або одноцільовій електрогенеруючій установці з підігрівом газу до температури T_0 після його розширення в детандері (3-3s).

Так як в системах, що аналізуються, мають місце процеси енергетичних перетворень різного потенціалу та якості, для аналізу доцільним являється застосування універсальної термодинамічної функції – ексергії, за допомогою якої враховуються обмеження як першого так і другого законів термодинаміки.

Ексергія, як відомо, характеризує енергію будь-якого виду не лише за її кількістю, а також дає можливість оцінити її якісну сторону та розрахувати деградаційні енергетичні втрати, кількість

Ексергетична потужність детандеру, кВт

$$N_D = \frac{1}{\eta_D} G_z \frac{k}{k-1} R T_1 \left\{ 1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right\} \quad (6)$$

де R – газова постійна, Дж/кг·К; z – коефіцієнт стиснення; k – показник адіабати.

Для коогенераційних установок з виробництвом електроенергії та холоду ексергетичний ККД розраховується наступним чином

$$\eta_2 = \frac{N_D + Ex_{Q_0}}{Ex_1 - Ex_{3s}}. \quad (7)$$

Ексергія охолодженого потоку газу

$$Ex_{Q_0} = G \left[c_p (T_{3s} - T_3) \right] \left(\frac{T_0 - T_{m0}}{T_{m0}} \right) \quad (8)$$

де T_{m0} – середньопланіметрична температура при підводі теплоти

$$T_{m0} = \frac{T_{3s} - T_3}{\ln \frac{T_{3s}}{T_3}} \quad (9)$$

Енергетичні розрахунки та ексергетичний аналіз виконувались за аналітичними рівняннями для потоку ідеального газу при наступних фіксованих параметрах: тиск на вході ГРС – 5,2 МПа; тиск на виході із ГРС – 1,2 МПа; внутрішній (адіабатний) ККД детандеру – 80%; пропускна спроможність – 2,5 кг/с.

Середні значення фізичних величин природнього газу при 5,2 МПа: коефіцієнт стиснення – 0,911; показник адіабати – $k = 1,357$; ізобарна теплоємність – $C_p = 2,54$ кДж/кг·К; внутрішній (адіабатний) ККД турбодетандеру – 80 %; ефективний ККД – 98%; електричний ККД – 92 %; концентрація метану в природньому газі – 98%

Результати розрахунків когенераційної (схема з охолодженням В) та одноцільової електрогенеруючої установок (схема з підігрівом А) для різних температур навколишнього середовища приводяться в таблиці, а відповідні діаграми ексергетичних потоків, які відповідають температурі зовнішнього середовища 20 °С показані на рис. 6.

Таблиця – Ексергетичні показники УТДА

	Схема з охолодженням (В)			Схема з підігрівом (А)		
Температура навколишнього середовища, К	273	293	313	273	293	313
Ексергія магістрального газу, кВт	1805,0	1937,3	2069,8	1805,0	1937,3	2069,8
Ексергія після дроселювання, кВт	1135,4	1217,8	1301,3	1135,3	1217,8	1301,3
Температура після детандеру, К	203,2	218,6	233	273	293	313
Ексергія газу після турбодетандеру, кВт	1204,0	1290,3	1380,0	1135,3	1217,8	1301,3
Потужність детандеру, кВт	443,2	472,4	508,0	596,8	640,1	684
Втрати ексергії в детандері, кВт	157,8	167,3	178,8	156,2	169,6	178,3
Втрати ексергії при дроселюванні, кВт	669,3	718,5	766,5	669,3	718,4	766,5
Температура газу перед детандером, К	273	293	313	366,8	393,8	420,7
Тепловий потік, кВт				596,75	640,1	684
Холодильна потужність, кВт	443,2	472,5	508,0			
Ексергія холоду, кВт	69,6	72,7	78,6			
Ексергія теплоти, кВт				83,6	90,2	95,7
Витрата газу при підігріві, кг/с				0,149	0,159	0,165
Ексергетичний ККД	76,5	76,4	76,3	79,2	79,0	79,1

4. Аналіз результатів та висновки

Впровадження технологій енергозбереження в газотранспортній системі при альтернативній заміні енергетично неефективного процесу зниження тиску газу в РДУ на його адіабатичне розширення в турбодетандерних агрегатах з виробництвом електричної енергії дозволяє суттєво

зменшити деградаційні енергетичні втрати. Ексергетичні втрати установках з УТДА приблизно на 76 % менші в порівнянні з традиційними РДУ, що підкреслює високий рівень енергозбереження на основі утилізації потенційної енергії природнього газу.

Аналіз розрахунків та діаграм ексергетичних потоків показує, що в енергетичних перетворюю-

ваннях, які мають місце в турбодетандерних агрегатах, значне місце займає потік транзитної ексергії, який складає відповідно до схем установок 60% та 62,8 % від вхідного потоку ексергії, та загалом не впливає на ефективність енергетичних

перетворювань. Наявність транзитного потоку ексергії обумовлюється тим, що потенційна енергія потоку газу при розширенні в детандері утилізується тільки частково, так як далі газ направляється до споживання з підвищеним тиском.

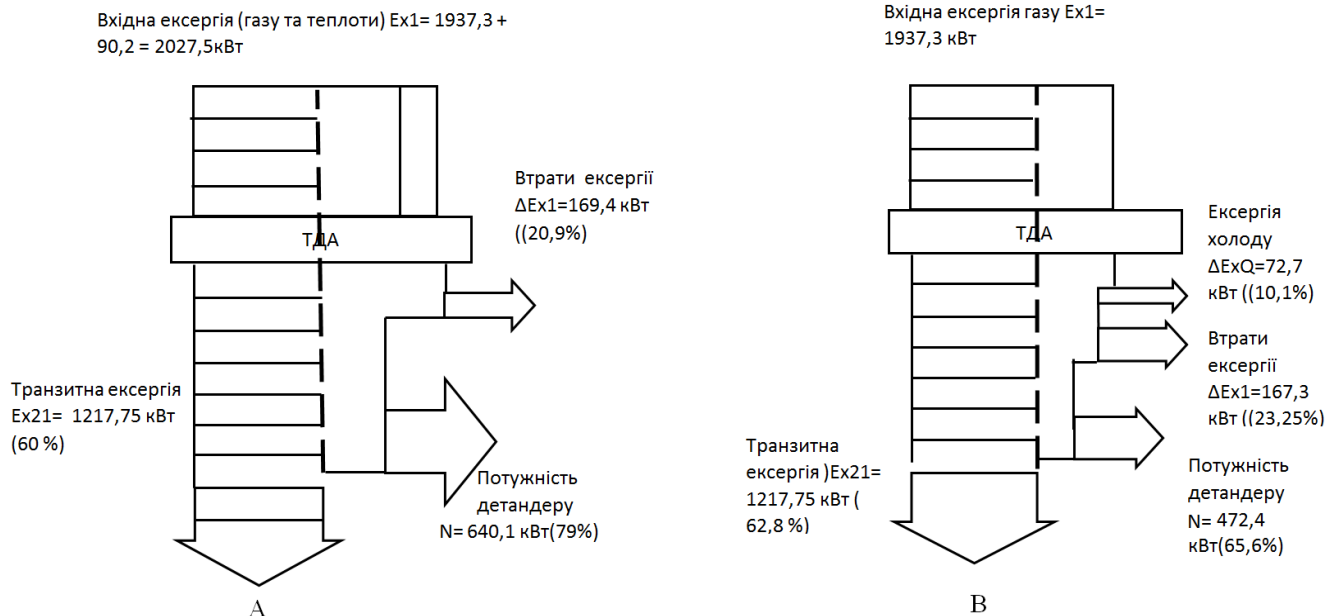


Рисунок 6 – Діаграми ексергетичних потоків одноцільової енергогенеруючої (А) та когенераційної (В) УТДА

Проведені порівняння ексергетичних характеристик одноцільового та когенераційного турбодетандерних агрегатів показують, що ексергетичний ККД електрогенеруючого ТДА з підігрівом навіть декілька вищий (79%) по відношенню до когенераційної схеми без попереднього підігріву газу (76,4%). Це пояснюється суттєвим впливом температури підігріву газу на електричну потужність одноцільового УТДА (вихідну ексергію), яка зростає на 26 % в той час, як ексергія теплоти підігріву підвищує вхідну ексергію всього на 12,5%.

Зміна температури навколишнього середовища практично не впливає на ексергетичний ККД турбодетандерної установки, але суттєво впливає на електричну потужність. Наприклад, при зміні температури зовнішнього середовища від 0 до 40 °C загальний ексергетичний ККД практично не змінюється, в той час як електрична потужність детандера зростає на 15 %.

Порівняння одноцільових УТДА з підігрівом газу до та після детандеру, показує, що установки з підігрівом перед детандером є більш ефективними, незважаючи на те, що підігрів після розширення в детандері, в принципі, може здійснюватись за рахунок теплової енергії навколишнього

середовища. Як показують розрахунки, ексергетичний ККД ТДА з підігрівом газу перед розширенням в детандері дорівнює 79%, в той час як при аналогічних умовах при підігріві після розширення цей коефіцієнт відповідає рівню 66%.

З енергетичної точки зору застосування установок з одночасним виробництвом електричної енергії та холоду є менш ефективним по відношенню до схем з підігрівом перед ТДА і тому застосування таких схем, особливо на невеликих ГРС, не завжди є доцільним. До того ж при цьому суттєво ускладнюється технічна схема редуційного вузла та його експлуатація так як добавляється технологічне устаткування пов'язане з практичним застосуванням охолодженого потоку газу для холодильних камер або в якості першого шабля технологічної лінії для зрідження природного газу.

Загалом техніко-економічна доцільність будь якої утилізаційної турбодетандерної установки, як відомо, визначається на основі загальних мінімальних суспільно-необхідних витрат при врахуванні не тільки її енергетичних показників, але і багатьох інших факторів, пов'язаних з потужністю, місцем її впровадження, наявністю споживачів електроенергії та холоду, технологічною та еколо-

гічною безпекою, капітальними та експлуатаційними затратами.

Література

1. Агабабов В.С. та ін. Порівняння різних способів підігріву газу в детандерно-генераторному агрегаті // Теплоенергетика. – 2003. – №6. – С. 45-50.
2. Байков І.Р., Молчанова Р.А., Кулагіна О.В. Потенціал енергохолодильного комплексу на газорозподільних станціях та можливості його реалізації // Технології нафти та газу. – 2015. – № 3 (98). – С. 42-48.
3. Бродяньський В.М., Фратшер В., Міхалек К. Ексергетичний метод та його застосування. – М.: Вища школа, 1988. – 288 с.
4. Волянська Л.Г. та ін. Оцінка термодинамічної ефективності використання детандерної установки // Наукоємні технології. – 2021. – Т.50, №2. – С. 160-169.
5. Говдяк Р.М. Утилізація енергії тиску природного газу в турбодетандерних установках на об'єктах газової промисловості // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2014. – №1. – С. 7-12.
6. Енергетична стратегія України до 2030 року. URL: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=260994> (дата звернення: 21.11.2021).
7. Костенко Д.А., Дмитренко В.О. Енергозберігаючий потенціал надлишкового тиску природного газу у газотранспортній системі України // Нафтова і газова промисловість. – 2003. – № 1. – С. 54.
8. Крущевіч С.П та ін. Покриття пікових навантажень в електричних мережах за рахунок утилізації перепаду тиску на ГРС // Science Rise. – 2017. – № 12 (41). – С. 53-58.
9. Кулагіна, О.В., Байков І.Р., Гатаулліна А.Р., Молчанова Р.А. Ефективне використання енергетичних потоків природного газу з від'ємною температурою, одержаних у детандергенераторних агрегатах // Глобальний науковий потенціал. – 2014. – № 12 (45). – С. 15-20.
10. Мальханов В.А. Турбодетандерні агрегати в системах підготовки та розподілу природного газу. – М: Нафта та газ, 2004. – 226 с.
11. Романов В.В., Сітніков В.В. Нова детандер-генераторна установка НВКГ «Зоря-Машпроект» // Газотрубинні технології. – 2005. – № 2. – С. 40-42.
12. Романов В.А., Самігулін Т.О. Застосування турбодетандерних агрегатів з метою поповнення зрідженого газу // «Neftegaz.ru». – 2017. – №10.
13. Хетагуров В.А. та ін. Досвід та перспективи застосування турбодетандерних агрегатів на технологічних об'єктах газової промисловості // Газова промисловість. – 2018. – №11, (177). – С 14-22.
14. Черних А.І. Використання перепаду тиску газу, що редукується на ГРС та ГРП для отримання електроенергії та тепла // Вісник інженерної академії України. – 2009. – №1. – С. 251-256
15. Шаргут Я., Петела Р. Ексергія. Переклад з польської. – М: «Енергія», 1968. – 273 с.

Отримана в редакції 28.12.2021, прийнята до друку 19.01.2022

Exegetic analysis of energy saving processes in the gas transportation system

Valeryi Iaroshenko ✉

Odessa National Academy of Food Technologies, Dvoryanskaya str., 1/3, Odessa, 65082, Ukraine

✉ e-mail: valeryi@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6051-6848>

Introduction of energy saving technologies in the gas transmission system with alternative replacement of energy inefficient process of gas pressure reduction in throttle-reduction units by its adiabatic expansion in turboexpander units with electricity production allows to significantly reduce exergy losses. Utilization of excess pressure of natural gas in utilization turboexpander units (UTEU) can be effectively used for electricity generation, cold production and liquefaction of natural gas at compressor stations in the system of transport, distribution and consumption of gas. The application of exergy method in thermodynamic analysis of utilization UTEU allows to take into account the so-called transit flows of exergy, to calculate quantitative and qualitative characteristics of energy transformations with determination of their level of irreversibility in absolute and relative terms. Calculations of exergetic characteristics of single-purpose and

cogeneration turboexpander units show that the exergetic efficiency of single-purpose electric generating UTEU with heating is higher in relation to the cogeneration scheme without preheating of gas, which is due to significant influence of electricity by 26% while exergy heat heating increases the input exergy by only 12.5%. A comparison of the exergetic performance of single-purpose UTEUs with gas heating before and after the expander shows that heating systems before the expander are more efficient, although after expansion expansion, in principle, can be carried out due to thermal energy of the environment. In general, the practical feasibility of energy saving on the basis of UTEU is determined on the basis of the minimum socially necessary costs, which include all types of costs associated with the practical implementation of units and their operation.

Keywords: Energy saving; Gas transportation system; Utilization; Electricity generation; Heating; Exergy; Energy efficiency

References

1. Agababov, V.S. et al. (2003) Comparison of different methods of gas heating in the expander-generator unit. *Teploenergetyca*, 6, 45-50.
2. Baikov, I.R., Molchanova, R.A., Kulagina, O.V. (2015) Potential of energy cooling complex at gas distribution stations and possibilities of its realization. *Tekhnologii nafty ta gazu*, 3 (98), 42-48.
3. Brodyansky, V.M., Fratscher, V., Mikhalek, K. (1988) Exergetic method and its application. *M.: Higher school*, 288.
4. Volianska, L.G. et al. (2021) Estimation of thermodynamic efficiency of use of expander installation. *Naukoiemni tekhnologii*, 50, 2, 160-169.
5. Govdiak, R.M. (2014) Utilization of natural gas pressure energy in turboexpander installations at gas industry facilities. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i gazovykh rodovysch*, 1, 7-12.
6. Energy strategy of Ukraine until 2030. Retrieved November 21, 2021 from <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/do-cument?id=260994>.
7. Kostenko, D.A., Dmitrenko, V.O. (2003) Energy saving potential of natural gas overpressure in the gas transmission system of Ukraine. *Naftova i gazova promyslovist*, 1, 54.
8. Krushchnevich S.P. et al. (2017) Coverage of peak loads in electrical networks due to the utilization of the pressure drop across the GDS. *Science Rise*, 12 (41), 53-58.
9. Kulagina, O.V., Baikov, I.R., Gataullina, A.R., Molchanova, R.A. (2014) Efficient use of energy flows of natural gas with negative temperature, obtained in expander-generating units. *Globalnyi naukovyi potentsial*, 12 (45), 15-20.
10. Malkhanov, V.A. (2004) Turboexpander units in natural gas preparation and distribution systems. *M: Nafta ta gas*, 226.
11. Romanov, V.V., Sitnikov, V.V. (2005) New expander-generator installation of Zorya-Mashproekt. *Gazoturbinni tekhnologii*, 2, 40-42.
12. Romanov, V.A., Samigulin, T.O. (2017) The use of turboexpander units to replenish liquefied gas. *Neftegaz.ru*, 10.
13. Khetagurov, V.A. et al. (2018) Experience and prospects of application of turboexpander units at technological objects of gas industry. *Gazova promyslovist*, 11, (177), 14-22.
14. Chernykh, A.I. (2009) The use of the pressure drop of gas that is reduced on GDS and fracturing to obtain electricity and heat. *Visnyk inzhenernoi akademii Ukrainy*, 1, 251-256
15. Shargut, J., Petela, R. (1968) Exergy. Translated from Polish. *M: Energiia*, 273.

Received 28 December 2021

Approved 19 January 2022

Available in Internet 30 March 2022