

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного

**Сарапін Володимир Павлович**



УДК 621.692

**УДОСКОНАЛЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ТУРБОДЕТАНДЕРНИХ УСТАНОВОК, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В СИСТЕМАХ  
ТРАНСПОРТУ ПРИРОДНОГО ГАЗУ**

Спеціальність 05.05.16 – «Турбомашини та турбоустановки»

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор,  
член-кореспондент НАН України  
**Шубенко Олександр Леонідович**,  
Інститут проблем машинобудування  
ім. А.М. Підгорного НАН України,  
завідувач відділом оптимізації  
процесів та конструкцій турбомашин

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Парафійник Володимир Петрович**  
ПАТ «Сумське науково виробниче об'єднання»,  
Спеціальне конструкторське бюро  
провідний науковий співробітник

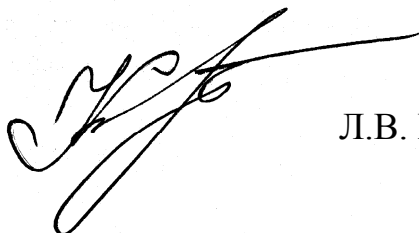
кандидат технічних наук, доцент  
**Юдін Юрій Олексійович**  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»  
професор кафедри турбінобудування

Захист відбудеться «17» листопада 2016 р. о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.180.02 в Інституті проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України за адресою: 61046, м. Харків, вул. Дм. Пожарського 2/10.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України за адресою: 61046, м. Харків, вул. Дм. Пожарського 2/10.

Автореферат розісланий «13» жовтня 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
доктор технічних наук



Л.В. Колодяжна

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** В останні роки світова економіка характеризується зростанням споживання корисних копалин, що призвело до підвищеного попиту на енергозберігаючі технології для нафтогазової промисловості. Один з напрямків енергозбереження для газодобувної та газотранспортної системи пов'язаний з використанням турбодетандерних агрегатів. Підвищення техніко-економічних показників газової промисловості досягається за рахунок розробки нових принципів технологічних схем підготовки та транспорту газу, а також конструкцій турбодетандерних агрегатів.

Основоположником використання турбодетандерів у технології переробки газів є академік Капіца П.Л. Великий внесок у розвиток технологічних схем видобутку та транспортування природного газу та удосконалення конструкцій турбодетандерних установок внесли Язів О.В., Єпіфанова В.І., Степанець О.О., Мальханов О.В. та інші. У той же час для підвищення ефективності роботи газодобувного та газотранспортного комплексів цілий ряд проблемних питань, таких як: підвищення якості природного газу, який подається у магістральний газопровід; вироблення електроенергії за рахунок потенційної енергії стиснутого газу та інші, потребують досконалих рішень.

Турбодетандери – це турбомашини, в яких за рахунок розширення газоподібного робочого тіла (природного газу) виробляється механічна енергія. Їх використання дозволяє збільшити ефективність роботи газового комплексу за рахунок підвищення якості природного газу, а також вироблення додаткової електроенергії.

Отримання високих показників ефективності схем підготовки газу з використанням турбодетандерів нових конструкцій базується на врахуванні реальних властивостей природного газу та змінних режимів роботи газових комплексів.

Важливу роль при створенні високоефективних турбодетандерів відіграє вибір раціональних форм проточної частини, профілів лопаткових апаратів та урахування особливостей їх експлуатації у різних умовах.

Таким чином, актуальність роботи зі створення енергозберігаючих технологій з використанням турбодетандерів як за рахунок підвищення ефективності технологічних схем підготовки газу, так і впровадження нових, більш досконалих конструкцій проточних частин цих машин, обумовлена досягненням суттєвого економічного ефекту.

**Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана згідно з енергетичною стратегією України на період до 2030 року (затверджена розпорядженням Кабінету Міністрів України №145-р від 15.03.2006 р.).

Робота є складовою частиною комплексу досліджень, що проводяться в Інституті проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України за бюджетними темами «Підвищення ефективності теплових турбоустановок на основі удосконалення термодинамічних циклів та робочих процесів у проточних частинах» (№ДР 0113U007656), «Розробка когенераційних установок

малої потужності, що працюють на низькокиплячих робочих тілах» (№ДР 0114U001442), де автор є виконавцем окремих підрозділів.

**Мета і завдання дослідження.** Мета дисертаційної роботи полягає у створенні нових принципових технологічних схем з використанням турбодетандерів в системі добування та транспорту газу, розробці нових конструкцій та підвищенні ефективності проточних частин турбодетандерів.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі **задачі**:

- проаналізувати традиційне і розробити спеціалізоване програмне забезпечення для аналізу існуючих технологічних схем підготовки газу з використанням турбодетандерів, їх конструкцій та режимів роботи в умовах газових родовищ; вибрати напрямок досліджень;

- запропонувати нову технологічну схему підготовки газу з використанням турбодетандерного агрегату для низькотемпературної сепарації природного газу;

- розробити технологічні схеми для газорозподільної станції (ГРС):

- з підігрівом транспортного газу після турбодетандера;
- зі споживачами газу різного тиску;

- створити метод та програмний продукт вибору номінальних параметрів турбодетандерного агрегату для роботи на ГРС з метою отримання максимального річного вироблення електроенергії;

- удосконалити конструкцію турбодетандера для експлуатації на змінних режимах за рахунок розробки раціональних форм профілів лопаткових апаратів.

*Об'єкт дослідження* – термогазодинамічні процеси, що проходять у системах підготовки і транспортування природного газу, в тому числі у проточній частині турбодетандерів.

*Предмет дослідження* – удосконалення робочих процесів та конструкцій турбодетандерних установок з метою підвищення показників їх ефективності в широкому діапазоні режимів у різних умовах використання.

**Методи дослідження** – методи математичного моделювання процесів в елементах принципових схем; методи оптимізації для вибору номінальних параметрів утилізаційних турбодетандерів, методи 3-D розрахунків проточних частин, методи обробки результатів натурних іспитів турбодетандерних агрегатів.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

1. Вперше запропоновано науковий підхід для вирішення проблеми низькотемпературної сепарації природного газу на газових промислах із свердловинами різного тиску.

2. Вперше запропоновано схеми для газорозподільної станції на базі утилізаційної турбодетандерної установки для спільної роботи з повітряною кліматичною системою та для станції зі споживачами газу різного тиску.

3. Запропоновано новий метод вибору номінальних параметрів турбодетандерного агрегату для газорозподільної станції.

4. На основі комплексних чисельних досліджень вперше отримано характер впливу геометричних характеристик профілів робочих лопаток турбодетандера на ефективність його роботи при змінних режимах експлуатації.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає у наступному:

1. Запропоновано принципові схеми низькотемпературної сепарації природного газу для газового родовища зі свердловинами різного пластового тиску, утилізаційної турбодетандерної установки для спільної роботи з повітряною кліматичною системою та утилізаційної турбодетандерної установки з відборами для споживачів різного тиску.

2. Розроблено програмний продукт оптимального вибору номінальних параметрів турбодетандера, що дозволить отримати максимальну кількість електроенергії за рік з урахуванням різноманітних режимів роботи газорозподільної станції.

З використанням отриманих результатів були розроблені утилізаційні установки для наступних об'єктів: ТЕЦ-4 м. Мінськ (Білорусія); ГРС-1 м. Одеса (Україна); ГРС-1 м. Запоріжжя (Україна); ГРС-1 м. Сєвєродонецьк (Україна); ТЕЦ-2 м. Гоміль (Білорусія); ГРЕС м. Лукомль (Білорусія); ГПУ ГС «Солоха» (Україна) та інші.

3. Надано рекомендації щодо профілювання робочих лопаток проточної частини турбодетандерів з урахуванням більш ефективної роботи на режимах, відмінних від номінального, для наступних агрегатів: НТДА 2,9-6,9-У1 та НТДА 4,9-6,9-У1 (УНТС НГКМ «Кокдумалак», Узбекистан), МТДА 9,0-4,5-У1 (УПБС ГКМ «Шуртан», Узбекистан), МТДА 2,9-6,8-У1 (УКПГ «Зеварди» і «Памук», Узбекистан), МТДА 1,2-3,2-МП-У2 (УКПГ «Машевка», Україна), МТДА 0,5-3,8-МП-У2 (УКПГ «Чутове», Україна), МТДА 0,5-4,0-МП-У2 (УКПГ «Східна Полтава», Україна) і для інших.

Розроблені методи та одержані результати досліджень використовуються на підприємстві ПАТ «Турбогаз» (м. Харків, акти впровадження від 15.10.2015 р.), а також у наукових та практичних роботах відділу оптимізації процесів і конструкцій турбомашин Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України.

**Особистий внесок здобувача.** Опубліковані матеріали повністю відображують зміст досліджень, що представлені в дисертаційній роботі. В роботах, які виконані в співавторстві, автору належать:

- розробка математичної моделі розрахунку змінних режимів роботи турбодетандерного агрегату [1, 7];
- розробка математичної моделі для отримання оптимальних номінальних параметрів турбодетандерного агрегату [2, 9];
- пропозиції щодо геометричних характеристик профілів робочих лопаток [3, 8];
- запропоновано принципову схему низькотемпературної сепарації природного газу та виконано її термогазодинамічні розрахунки [4, 6, 10];
- запропоновано принципову схему утилізаційного турбодетандера для спільної роботи з повітряною кліматичною системою та виконано її термогазодинамічні розрахунки [5].

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати досліджень за темою дисертації доповідались та обговорювались на: X Міжнародному конгресі двигунобудівників (с. Рибаче, Україна, 2005 р.);

науково-практичній конференції «Енергоефективність, альтернативна енергетика і екологічні проблеми» (м. Миколаїв-Коблево, 2006 р., 2007 р.); Всеукраїнській науково-технічній конференції «Проблеми енергозбереження України і шляхи їх вирішення» (м. Харків, НТУ «ХПІ», 2008 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования» (м. Харків, ІПМаш НАН України, 2009 р., 2015 р.); конференціях молодих вчених і спеціалістів «Сучасні проблеми машинобудування», (м. Харків, ІПМаш НАН України, 2007 р., 2014 р., 2015 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 10 наукових працях, з них 5 статей – у наукових фахових виданнях України, з яких 3 входять до наукометричних баз даних, 1 патент України, 4 роботи – матеріали міжнародних наукових конференцій.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 138 сторінок, з них: 110 сторінок основного тексту, 36 рисунків, 8 таблиць, 111 найменувань використаних джерел на 12 сторінках, 3 додатка на 16 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено загальну характеристику роботи, сформульовано мету, задачі і методи дослідження. Обґрунтовано актуальність теми, показано наукову новизну та практичну цінність результатів, що отримав здобувач. Наведено інформацію про публікації, апробацію роботи на наукових форумах, зв'язок роботи з науковими програмами, темами та власний внесок автора.

У **першому розділі** розглянуто питання, що пов'язані з технічним станом та умовами експлуатації турбодетандерів, а також проаналізовано проблеми, що виникають при створенні схем низькотемпературної сепарації природного газу та схем утилізації надлишкового тиску природного газу.

Розглянуто області використання турбодетандерів у газовій промисловості та наведено перелік колективів і організацій, які беруть участь в розробці турбодетандерних установок.

Наведено переваги та недоліки принципів технологічних схем переробки природного газу з дроселюючим пристроєм та ежектором, які використовуються на газових промислах.

Вказано технічні характеристики та конструкції декількох одних з перших розробок турбодетандерних агрегатів для низькотемпературної сепарації газу та утилізації надлишкового тиску природного газу на газорозподільних станціях.

Велику увагу приділено технологічним схемам з використанням турбодетандерів у процесах переробки, охолодження та редукування природного газу.

На підставі проведеного аналізу сформульовано мету і завдання дослідження, які полягають в науковому обґрунтуванні і розробці ефективних заходів щодо підвищення техніко-економічних показників газотранспортної

системи за рахунок вдосконалення принципів схем з використанням турбодетандерних установок та конструкцій турбодетандерних агрегатів.

У другому розділі представлено математичні моделі, методи та програмні засоби, що розроблено та впроваджено у дисертації стосовно обчислення процесів в елементах газових комплексів згідно зі схемами впровадження турбодетандерних агрегатів.

Проаналізовано літературні джерела з розрахунку фізичних параметрів багатокомпонентного складу природного газу, що дозволило вибрати для дослідження схем турбодетандерів та розрахунків їх проточних частин найбільш досконале рівняння Пенга-Робінсона. На базі цього рівняння створено метод розрахунку фізичних параметрів для багатокомпонентного природного газу. Розроблено програмний продукт, який дозволяє розраховувати фізичні параметри для багатокомпонентного складу природного газу та зводити отримані значення у таблиці.

Описано моделювання технологічних схем підготовки газу з використанням теплообмінників, сепараторів, турбодетандерів та компресорів. Кожен елемент схеми представлено у вигляді системи рівнянь. Всі елементи схеми пов'язані між собою характерними параметрами входу та виходу.

Приклад розрахункової моделі показано на рис. 1.

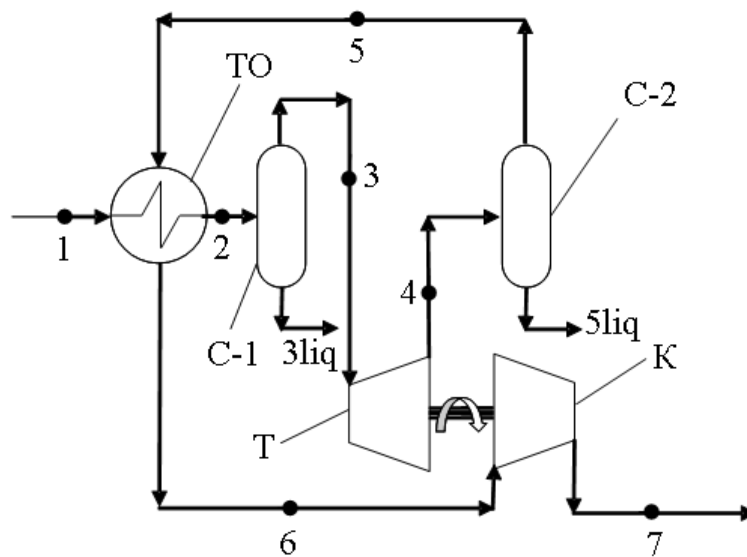


Рис. 1. Розрахункова модель низькотемпературної сепарації природного газу: ТО – рекуперативний теплообмінник; С-1, С-2 – сепаратор вторинної очистки и низькотемпературний; Т – турбодетандер; К – компресор; 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 – потоки газу; 3liq, 5liq – потоки газового конденсату

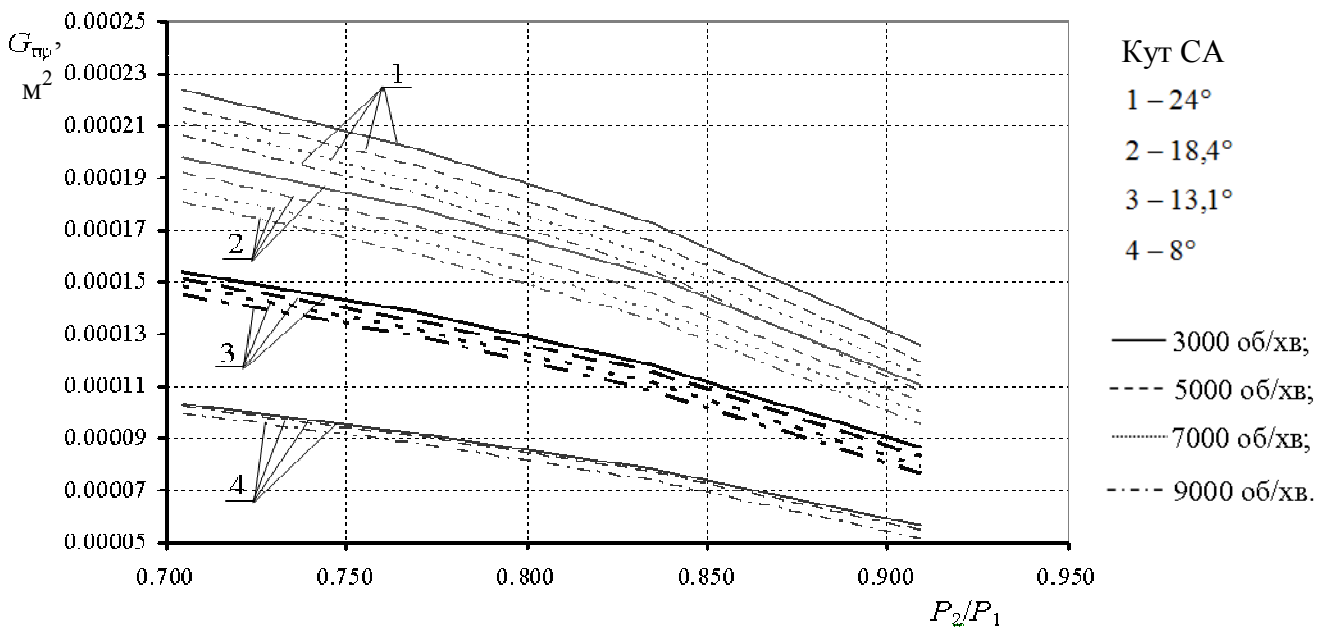
Представлено вид програмного комплексу, що розроблено автором для розрахунку режимів спільної роботи турбіни та компресору турбодетандерного агрегату. Алгоритм роботи комплексу оснований на використанні залежностей, які характеризують роботу турбіни та компресора. Значення для залежностей були отримані при проведенні 3-D розрахунків проточної частини у програмному комплексі FlowER. Вид залежностей на прикладі ТДА для установки комплексної підготовки газу «Кокдумалак» представлено на рис. 2 та 3.

Для турбіни (рис. 2.а) використовуються залежності приведенної витрати газу від відношення тисків для чотирьох значень кута виходу газу з соплового апарату (СА) та чотирьох значень частоти обертання, а також (рис. 2.б) коефіцієнта корисної дії від відношення тисків для чотирьох значень частоти обертання.

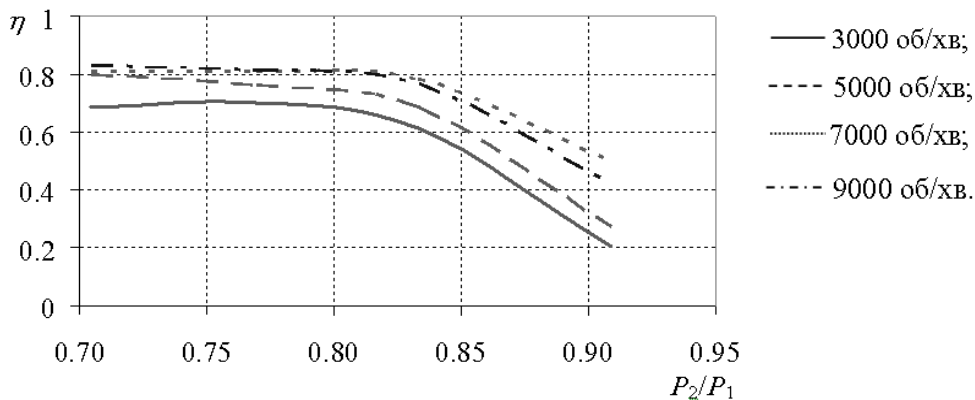
Приведена витрата  $G_{пр}$  розраховується за формулою

$$G_{пр} = \frac{G \cdot \sqrt{Z \cdot R \cdot T_1}}{P_1}, \quad (1)$$

де  $G$  – масова витрата газу, кг/с; параметри газу на вході в турбіну:  $T_1$  – температура, К;  $P_1$  – абсолютний тиск, Па;  $Z$  – коефіцієнт стиснення;  $R$  – газова постійна, Дж/(кг·К).



а)



б)

Рис. 2. Залежності для турбіни при змінному куті встановлення соплового апарату: а) – приведена витрата від відношення тисків; б) – коефіцієнт корисної дії від відношення тисків



Для компресора використовуються залежності безрозмірних коефіцієнтів корисної дії  $\eta$  та напору  $\psi$  від витрати  $\varphi$  (рис. 3), які розраховуються за формулами

$$\psi = \frac{3600 \cdot H_{\text{ад}_к}}{\pi^2 \cdot D_2^2 \cdot n^2}, \quad (2)$$

$$\varphi = \frac{240 \cdot G}{\rho_3 \cdot \pi^2 \cdot D_2^3 \cdot n}, \quad (3)$$

де  $G$  – масова витрата газу, кг/с;  $\rho_3$  – щільність газу на вході у компресор, кг/м<sup>3</sup>;  $\pi$  – число Пі;  $D_2$  – діаметр колеса по вихідним кромкам робочих лопаток, м;  $n$  – частота обертання робочого колеса, об/хв;  $H_{\text{ад}_к}$  – адіабатний тепловий перепад на компресорі, Дж/кг.

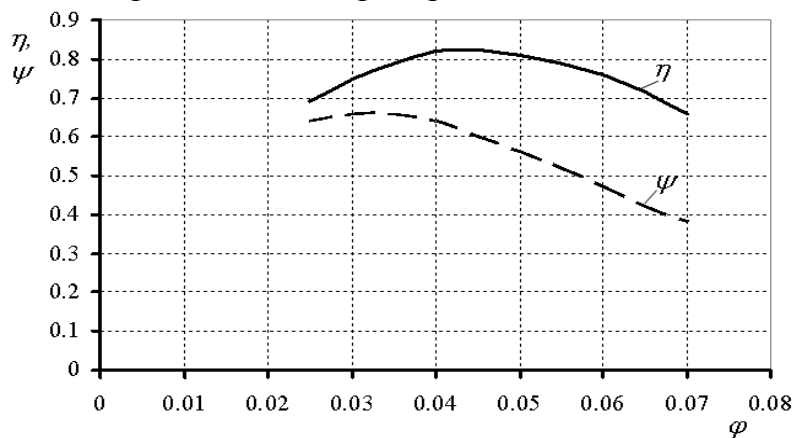


Рис. 3. Залежності для компресора:  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії;  $\psi$  – коефіцієнт напору,  $\varphi$  – коефіцієнт витрати

З метою верифікації розробленого програмного комплексу виконано розрахунки спільної роботи турбіни та компресора. Одержані результати порівнювались з даними експлуатації турбодетандерного агрегату та наведені на рис. 4, 5, 6.

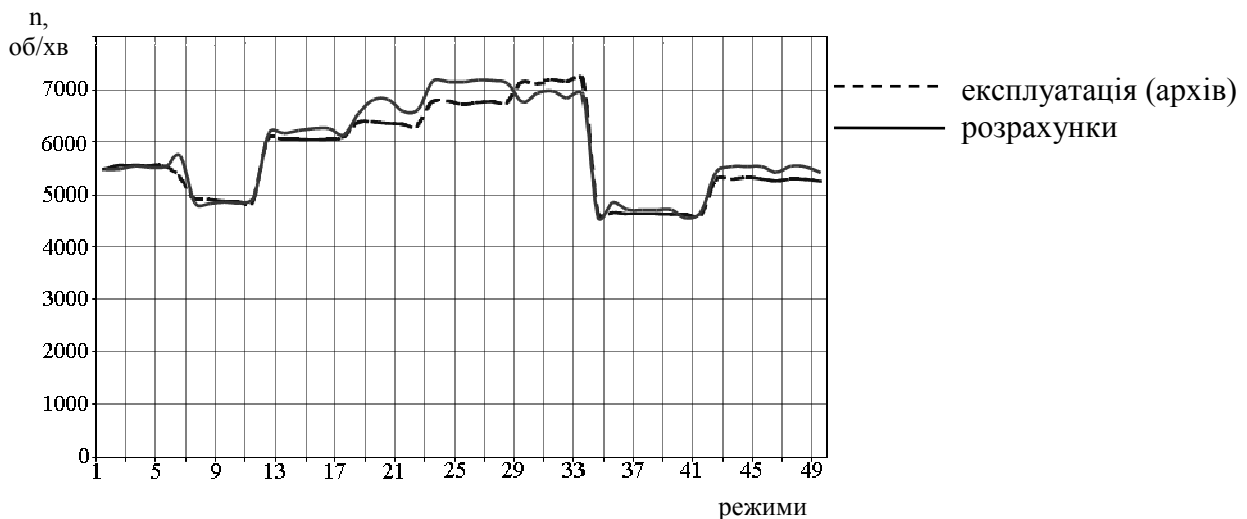


Рис. 4. Частота обертання ротора

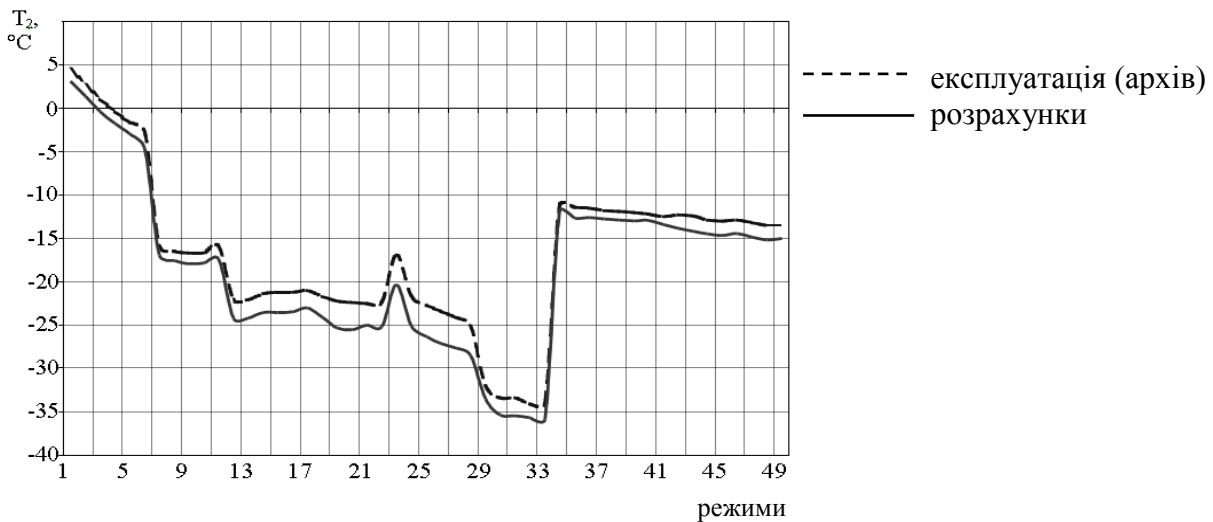


Рис. 5. Температура на виході з турбіни

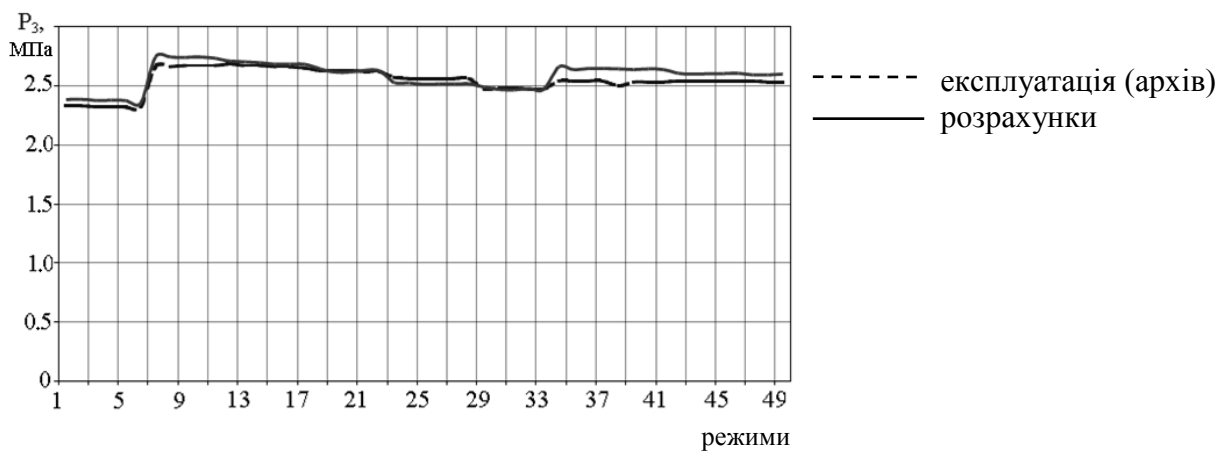


Рис. 6. Тиск на вході у компресор

Запропоновано метод розрахунку номінальних параметрів утилізаційної турбодетандерної установки для роботи на змінних режимах газорозподільної станції при отриманні найбільшої річної виробки електричної енергії.

Показано, що для створення елементів проточної частини доцільно використати сучасний підхід розрахунку тривимірної в'язкої течії у проточних частинах турбодетандерів, який базується на вирішенні системи рівнянь Нав'є-Стокса. При цьому характеристики робочого тіла (природного газу) розраховуються на основі показника адіабати та газової постійної, які одержані для реального газу.

У роботі для розрахунків течії природного газу в проточних частинах турбодетандерів використано комплекс програм FlowER, що розроблено в ІПМаш НАН України С.В. Єршовим та А.В. Русановим, розрахункова модель якого включає: нестационарні рівняння руху Нав'є-Стокса, осереднені за Рейнольдсом, двопараметричну диференційну модель турбулентності SST Ментера, неявну квазімонотонну ENO-схему другого порядку апроксимації.

**Третій розділ** присвячено розробці деяких принципових схем з турбодетандерами для газових промислів та газорозподільних станцій, що суттєво розширюють ділянку їхнього використання.

На рис. 7 представлено схему для газового комплексу низькотемпературної сепарації природного газу родовища зі свердловинами різного тиску.

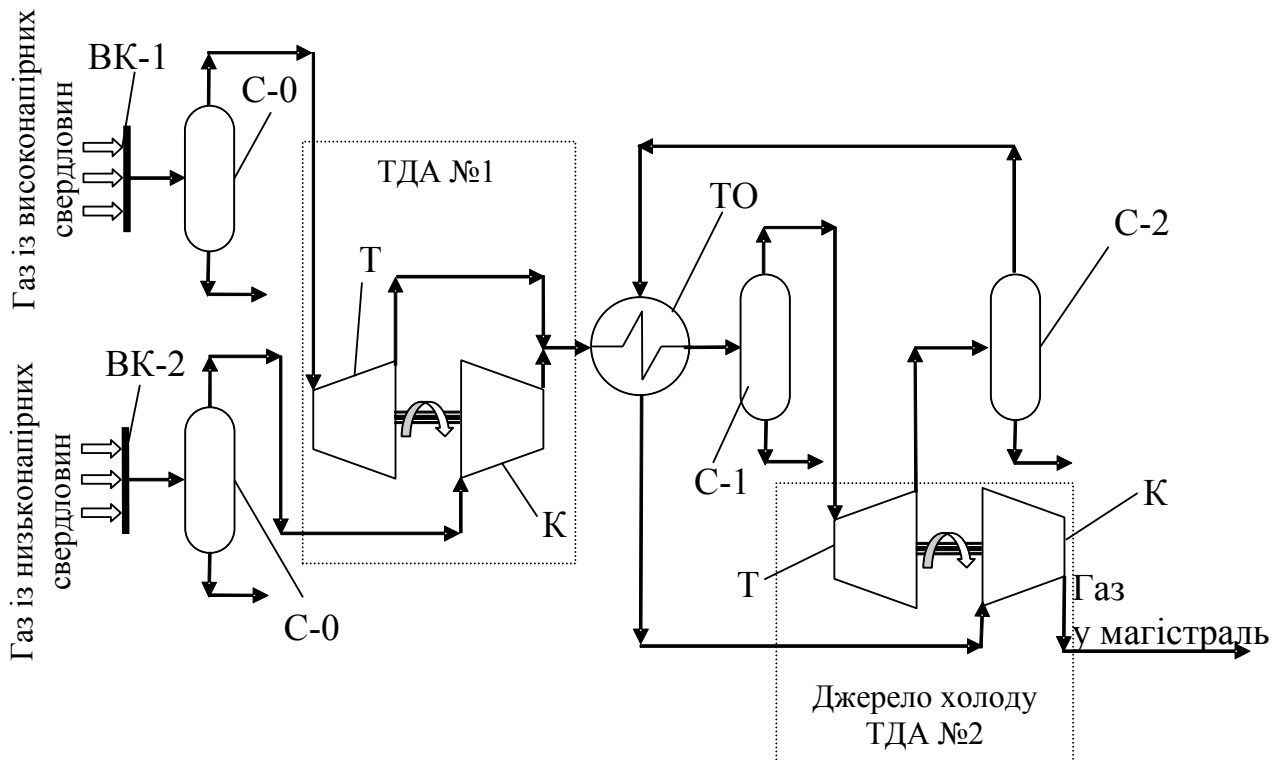


Рис. 7. Технологічна схема низькотемпературної сепарації з використанням додаткового турбодетандерного агрегату: ВК-1, ВК-2 – входні колектори високого та низького тисків; С-0, С-1, С-2 – сепаратори попереднього, вторинного очищення й низькотемпературний; ТО – рекуперативний теплообмінник; ТДА – турбодетандерний агрегат, який складається з турбодетандера Т і компресора К

В основу розробки цієї схеми вкладену ідею використання потенційної енергії газового потоку від свердловин високого тиску для підняття тиску газу свердловин з низьким тиском. Підвищення тиску досягається компресором, енергія для приводу якого виробляється турбіною. Вони розташовані на одному валу. Запропоноване рішення може бути виконано і для схем, у яких джерелом холоду являється дросельний пристрій.

Для отримання потрібного тиску на вході в рекуперативний теплообмінник необхідно, щоб виконувалась умова балансу потужностей турбіни та компресору, яку можливо записати у такому вигляді

$$G_1 \cdot \frac{k_1}{k_1 - 1} \cdot T_1 \cdot R_1 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{P_{TO}}{P_1} \right)^{\frac{k_1 - 1}{k_1}} \right] \cdot \eta_T = G_2 \cdot \frac{k_2}{k_2 - 1} \cdot T_2 \cdot R_2 \cdot \left[ \left( \frac{P_{TO}}{P_2} \right)^{\frac{k_2 - 1}{k_2}} - 1 \right] \cdot \frac{1}{\eta_K},$$

де  $G_1, G_2$  – масова витрата газу у лініях високого та низького тисків;  $k_1, k_2$  – показник адіабати для газу ліній високого та низького тисків;  $R_1, R_2$  – газові постійні для ліній високого та низького тисків;  $P_1, P_2, P_{TO}$  – тиски газу у лініях високого, низького тисків і на вході у рекуперативний теплообмінник;  $\eta_T, \eta_K$  – коефіцієнти корисної дії турбіни та компресору.

Залежності на рис. 8  $T_{T0} = f(P_2, G_1/G_2)$  та  $P_1 = f(P_2, G_1/G_2)$  одержані для наступних характеристик: температура газу в свердловині  $T_1 = T_2 = 10^\circ\text{C}$ , масова витрата газу з високонапірних свердловин  $G_1 = 30$  кг/с (131,7 тис. ст. м<sup>3</sup>/год.), тиск газу на вході в рекуперативний теплообмінник  $P_{T0} = 4,0$  МПа (абс), тиск газу у магістралі 3,0 МПа (абс).

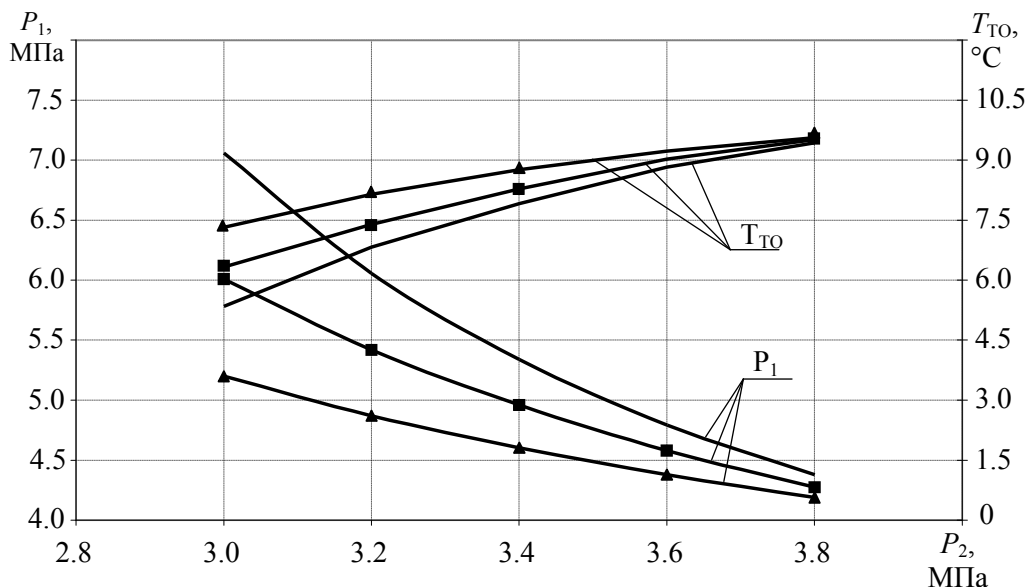


Рис. 8. Зміна температури газу на вході в рекуперативний теплообмінник і необхідний тиск високонапірних свердловин в залежності від тиску низьконапірних свердловин для співвідношення витрат газу:  
 —▲—  $G_1/G_2 = 0,5$ ;      —■—  $G_1/G_2 = 0,75$ ;      —□—  $G_1/G_2 = 1$

Друга запропонована схема використання турбодетандерів призначена для утилізаційної турбодетандерної установки у комплексі з повітряною кліматичною системою для роботи на газорозподільній станції. Газ після редукування необхідно підігрівати, а також підігріву потребують приміщення, розташовані на території станції. Звичайно для підігріву використовують газові котли, в яких спалюють природний газ. В основу розробки схеми, що пропонується у роботі, увійшло використання повітряних кліматичних систем для підігріву приміщень, енергію для приводу яких виробляють утилізаційні турбодетандери за рахунок розширення природного газу на самій станції. Запропонована схема зображена на рис. 9.

На схемі зображено газорозподільну станцію (ГРС), утилізаційну турбодетандерну установку (УТДУ) і повітряну кліматичну систему (ПКС). ГРС складається з дросельного пристрою (Др), сепаратора (С), а також підігрівника газу (П). УТДУ представлено у вигляді турбодетандерного агрегату (ТД) і електрогенератора (ЕГ). ПКС представлено у вигляді вентилятора (В), рекуперативного теплообмінника (Р), турбіни (Т), електродвигуна (ЕД), компресора (К).

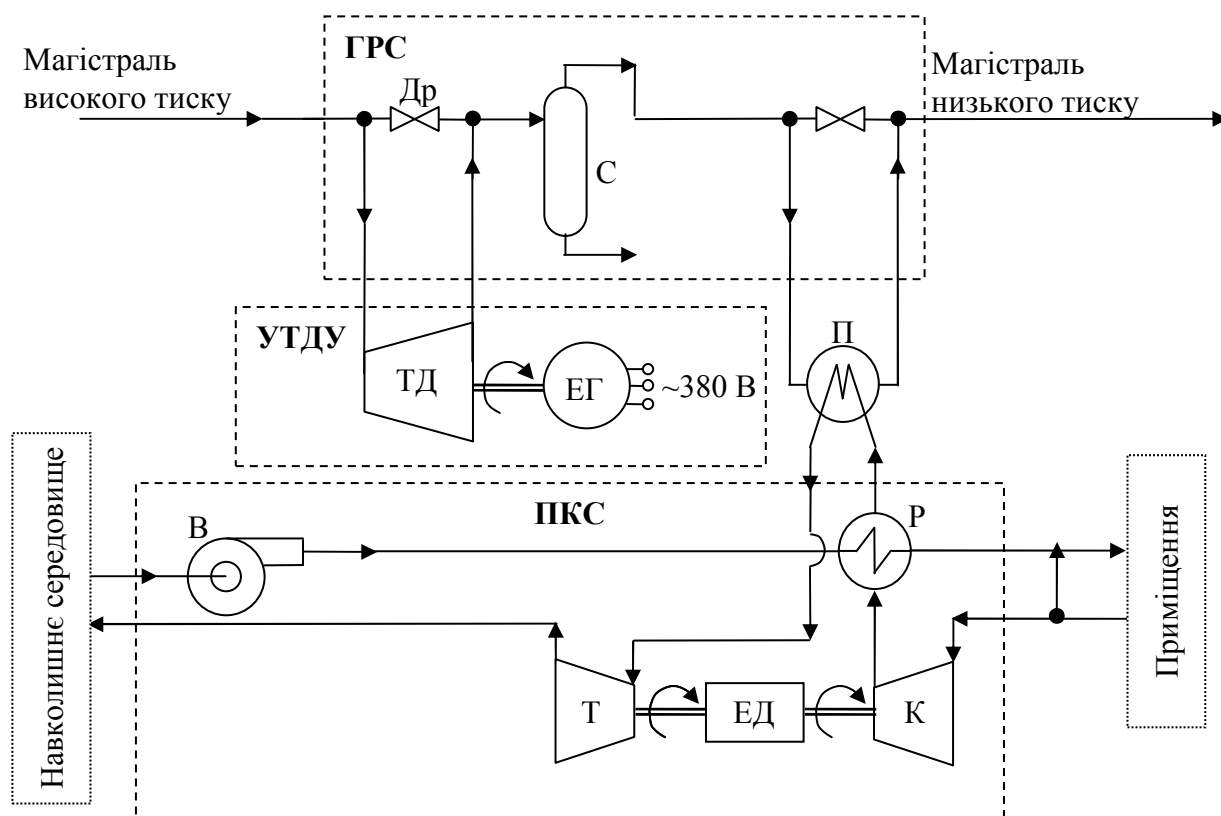


Рис. 9. Схема УТДУ з ПКС для роботи на ГРС

Одночасно за допомогою запропонованої схеми вирішується питання підігріву газу на виході з турбодетандерної установки, щоб не допустити температури газу нижче  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Для аналізу ефективності цієї схеми проведено розрахунок параметрів газу для ГРС Каланчак (Херсонська обл.), на якій для обігріву приміщень використовувались два котли загальною потужністю 100 кВт. Були отримані такі результати: при розширенні природного газу утилізаційна установка виробляє електричну енергію 112,5 кВт, для підігріву газу на виході з турбодетандеру потрібна теплова потужність 123,1 кВт, кількість споживання електричної енергії повітряною кліматичною системою разом з вентилятором дорівнює 112 кВт, а кількість виробництва теплової енергії становить 223,5 кВт. Таким чином, кількості теплової енергії достатньо для підігріву приміщень та природного газу.

Третя схема, що представлена у дисертації – утилізаційна турбодетандерна установка з відборами газу для споживачів різного тиску. Як відомо, споживачі природного газу після ГРС використовують газ різної витрати та значення тиску. Звичайно це досягається за рахунок ступінчатого зниження тиску в декількох дросельних пристроях. При такому зниженні тиску повністю втрачається потенційна енергія тиску природного газу. Використання турбодетандерів до першого відбору за найбільшим тиском призводить до втрати великої кількості потенційної енергії у наступних ступенях зниження.

Вирішення цієї проблеми досягається за рахунок встановлення багатоступеневого турбодетандера з відборами газу різного тиску. Схема установки представлена на рис. 10.

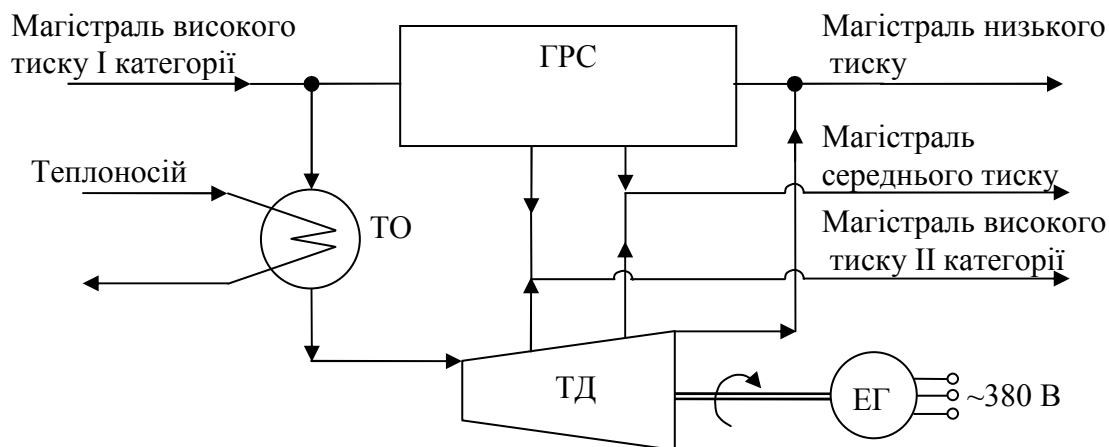


Рис. 10. Схема турбодетандерної установки з відборами для роботи на ГРС зі споживачами газу різного тиску

На схемі зображено компоновку газорозподільної станції ГРС, теплообмінник ТО, утилізаційний турбодетандер ТД, електрогенератор ЕГ, а також показані підводи та відводи газопроводів різного тиску природного газу.

Для прикладу було проведено розрахунок характеристик проточної частини утилізаційного турбодетандера на осереднені параметри газу, в результаті чого була отримана 10 ступенева конструкція з відборами газу після 3 та 6 ступені. Потужність такої установки склала 2600 кВт, виробництво електричної енергії за рік дорівнює 22,7 млн. кВт год., окупність – близько 4-5 років в залежності від режимів роботи протягом року.

**У четвертому розділі** на основі запропонованого методу розрахунку номінальних параметрів утилізаційної турбодетандерної установки представлено результати розрахунку річної виробки електроенергії при роботі на змінних режимах на прикладі ГРС-1 міста Одеси. Як відомо, газорозподільна станція працює на суттєво різних режимах роботи кожного місяця протягом року, але характер співвідношення витрати та тиску газу на вході приблизно зберігається кожного року. При найбільшому споживанні газу ( $Q$ ) тиск газу на вході ( $P_1$ ) має найменше значення, та, навпаки, при найменшому споживанні газу тиск на вході – найбільший. При цьому тиск газу на виході ( $P_2$ ) остається майже постійним протягом року. На рис. 11 наведено характер зміни параметрів газу на ГРС.

При такому характері зміни витрати й тиску газу на вході в ГРС турбодетандер не зможе повністю використати потенціал газового потоку через те, що характеристика турбін протилежна: для більшої витрати газу потрібно більше значення тиску на вході.

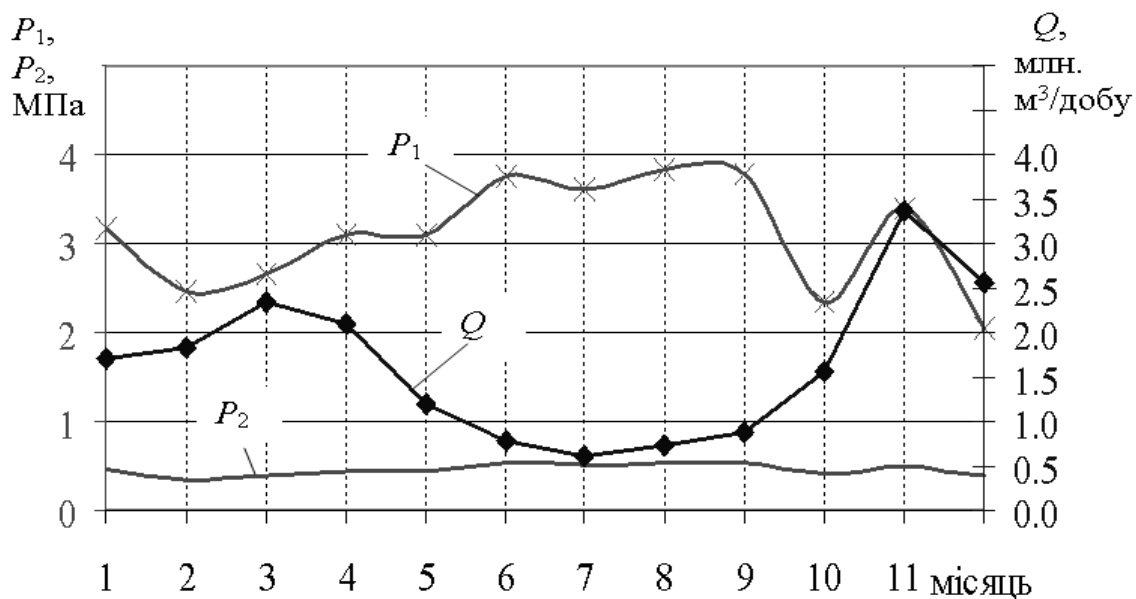


Рис. 11. Зміна параметрів газу ГРС протягом року

Для отримання максимальної річної виробки електричної енергії турбодетандерною установкою проведено чисельні оптимізаційні розрахунки, на основі яких вибрано номінальні параметри турбодетандера: витрата газу 2,111 млн. м<sup>3</sup>/добу і тиск газу на вході 2,778 МПа (абс), значення виробки електричної енергії за рік склало 17,7 млн. кВт·год., що на 12 % більше ніж при використанні в якості номінальних параметрів усереднених значень за рік. Графічний зв'язок тиску, витрати і вироблення електроенергії наведено на рис. 12.

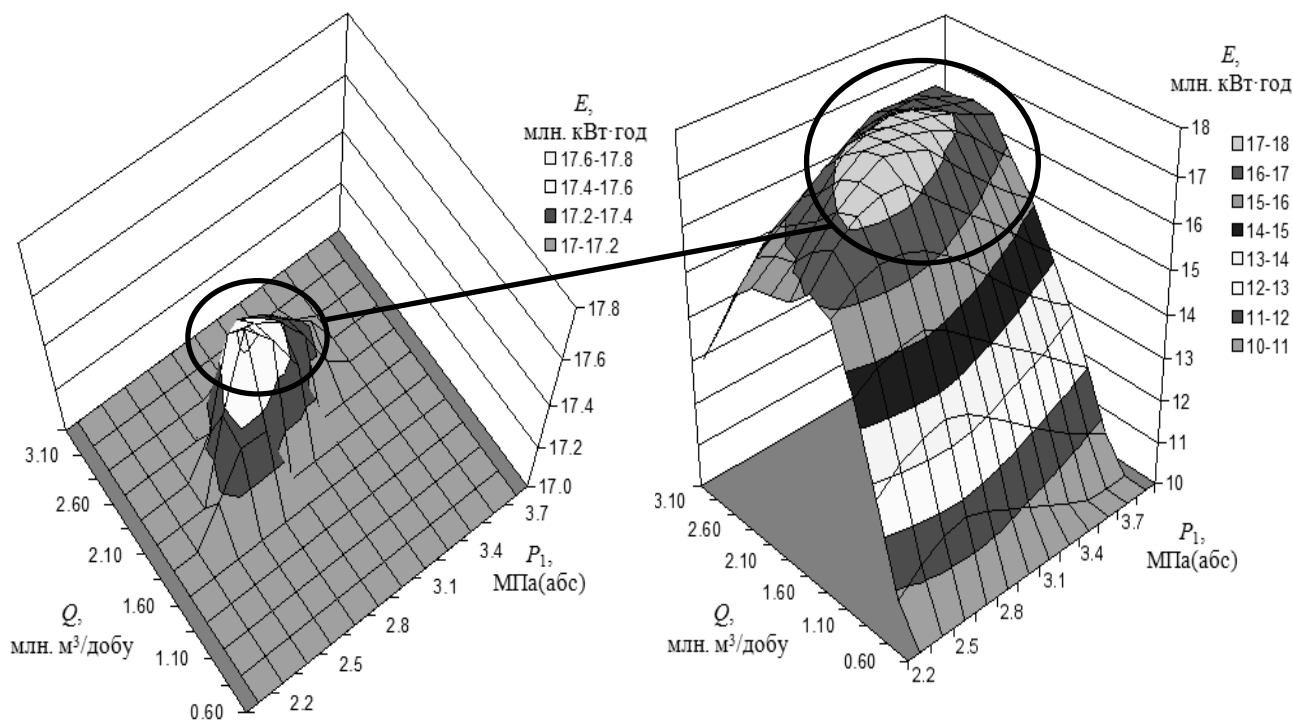


Рис. 12. Виробка електричної енергії за рік в залежності від витрати та тиску газу на вході в турбодетандер

Для більшого використання енергетичного потенціалу газового потоку необхідно використовувати УТДУ більш складної конструкції, наприклад: турбодетандер з поворотними сопловими лопатками, два паралельно встановлених турбодетандера, турбодетандер зі змінною проточною частиною.

У турбодетандері з поворотним сопловим апаратом є можливість збільшувати та зменшувати пропускну спроможність проточної частини при незмінному перепаді тиску.

Використання двох паралельно встановлених турбодетандерів дозволяє отримувати більший річний виробіток електроенергії за рахунок роботи турбодетандерів на більш ефективних режимах при вмиканні або вимиканні одного в залежності від кількості витрати газу.

Турбодетандер зі змінною вставкою дозволяє отримувати більший річний виробіток електроенергії за рахунок використання двох вставок, розрахованих на різну витрату газу, та роботи їх на більш ефективних режимах.

Результати розрахунків таких конструкцій наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

## Результати розрахунків річної виробки електричної енергії

Варіант конструкції*	1	2	3	4	5	6
Річна виробка електричної енергії E, млн. кВт·год.	26,16	15,5	17,7	21,84	19,65	19,36

\* 1 – потенціал газорозподільної станції при використанні умовного турбодетандера з постійним ККД протягом року та повним використанням параметрів газу; 2 – турбодетандер з номінальними параметрами, які вибрані по середньому значенню за рік; 3 – турбодетандер при оптимальному виборі номінальних параметрів; 4 – турбодетандер з регулюючим сопловим апаратом; 5 – два паралельно встановлені турбодетандера; 6 – використання змінної проточної частини турбодетандера в залежності від параметрів.

Як видно з таблиці 1, для більшого використання потенціалу газового потоку доцільно застосувати конструкцію турбодетандера з поворотним сопловим апаратом, або використовувати два турбодетандера. Але використання більш складних конструкцій може призвести до зростання вартості установки і, як слідство, збільшення терміну окупності. При виборі типу ТДУ потрібно проводити оцінку економічної доцільності використання конструкції турбодетандера у кожному випадку для наступної ГРС.

У п'ятому розділі на основі аналізу конструкцій ТДУ представлено результати газодинамічних розрахунків проточних частин турбодетандерного агрегату різних типів та надано рекомендації щодо розробки геометрії профілів робочих лопаток.

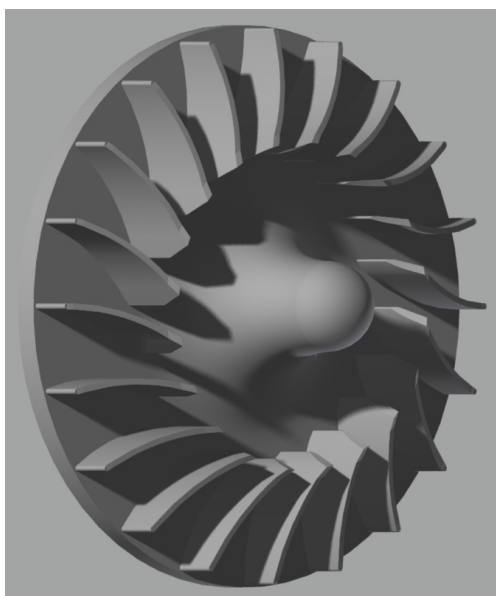
Враховуючи, що турбодетандерний агрегат рідко коли працює на розрахунковому режимі, при проектуванні проточної частини необхідно мати на



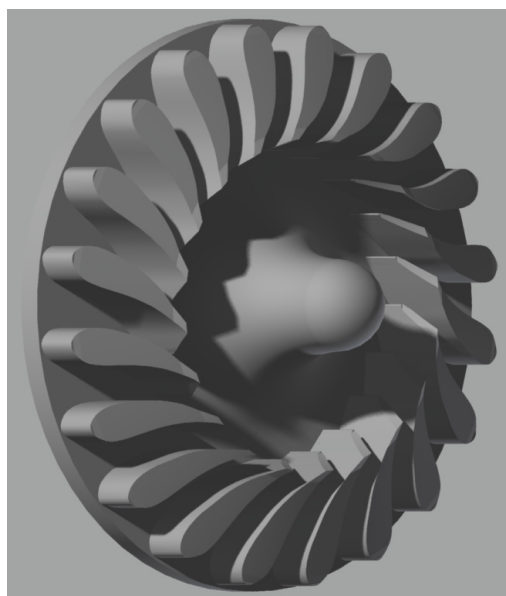
увазі факт роботи при незначному зниженні ефективності на режимах, відмінних від номінального.

Особливість роботи турбодетандера на режимах, відмінних від розрахункового, полягає у тому, що кут натікання газового потоку на робочий профіль відрізняється від геометричного кута, внаслідок чого відбувається відрив пограничного шару від поверхні лопатки, що призводить до утворення вихру в каналі.

Для аналізу впливу натікання газового потоку проведено газодинамічні розрахунки проточної частини № 1 (рис. 13.а) з пластинчастими профілями лопаток та проточної частини № 2 (рис. 13.б) з профілями спеціальної аеродинамічної форми.



а)



б)

Рис. 13. Тривимірне зображення робочих коліс: а) – проточна частина № 1, б) – проточна частина № 2

Форма аеродинамічного профілю була розроблена на основі збільшення діаметру кромки на вході таким чином, щоб уникнути ударного входу потоку у решітку, при цьому кути скелетної лінії зберігались, а криві переходу між вхідною та вихідною кромками були одержані при дотриманні умови відсутності відривів пограничного шару.

Розрахунки проточних частин доцентрових турбін було виконано на прикладі умов установки комплексної підготовки газу «Шуртан»: температура газу на вході в турбодетандер 219,49 К, абсолютний тиск природного газу на вході 4,23; 4,43; 4,63 МПа, частота обертання робочого колеса – 6000; 8000; 10000 об/хв, статичний тиск природного газу на виході з турбодетандера 2,686 МПа. Розрахунки виконувалися з використанням рівняння стану реального газу з константами: газова постійна 329 Дж/(кг·К), коефіцієнт адіабати 1,373.

Для порівняння двох проточних частин на рис. 14 зображено вектори швидкості газового потоку у лопатковому апараті робочого колеса, при різних значеннях частоти обертання.

Як видно із зображень векторів швидкості, у проточній частині № 1 виникають інтенсивні відриви та вихори при куті натікання, відмінному від розрахункового, в той час як у проточній частині № 2 відриви та вихори не спостерігаються.

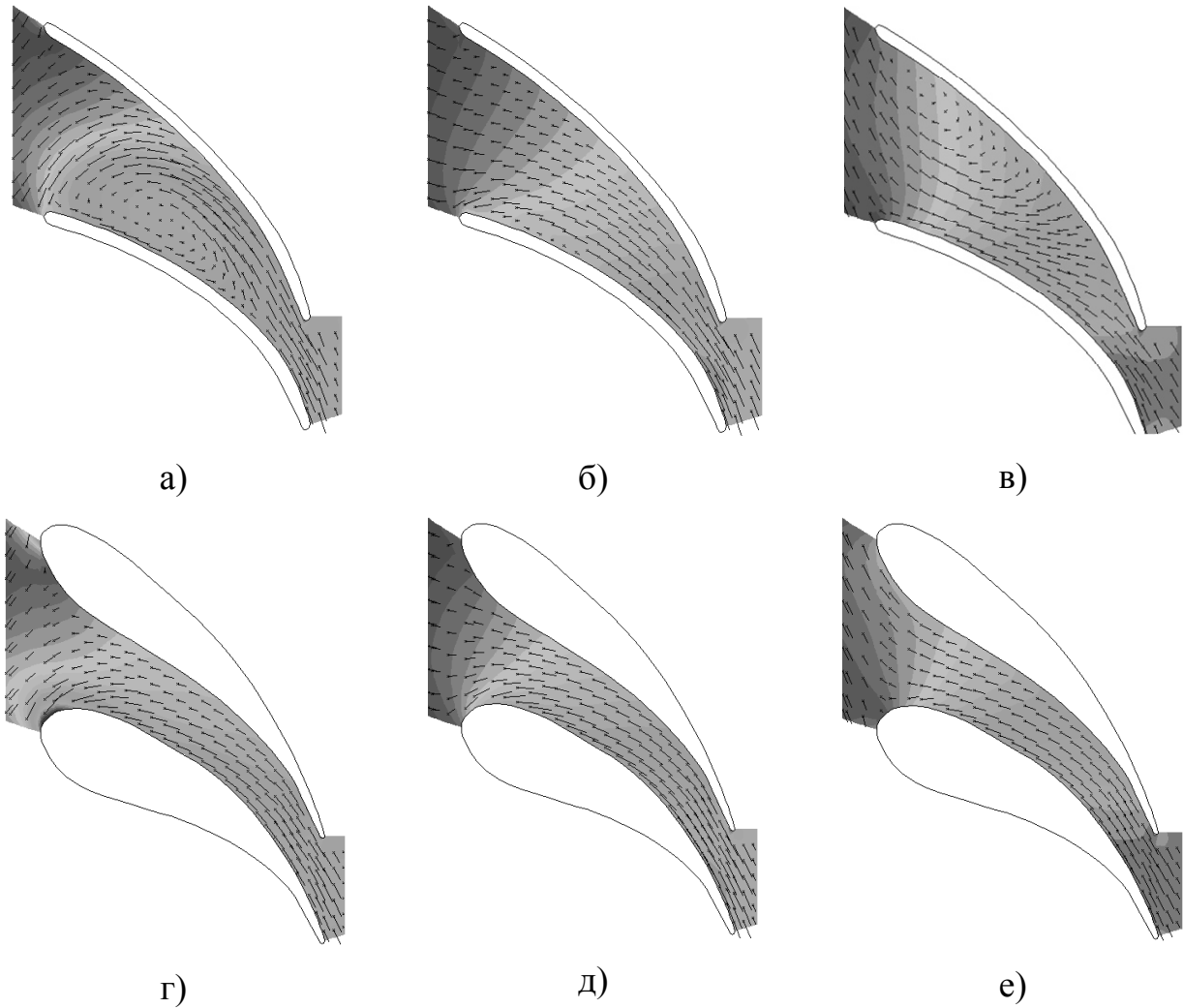


Рис. 14. Вектори швидкості газового потоку у лопатковому апараті робочого колеса: а), б), в) – проточна частина № 1; г), д), е) – проточна частина № 2; а), г) – 6000 об/хв; б), д) – 8000 об/хв; в), е) – 10000 об/хв

На основі отриманих результатів можна зробити висновок, що проточна частина № 2 перевершує в ефективності проточну частину № 1 у всьому діапазоні проведених розрахунків. Це пояснюється, в основному, тим, що у конструкції № 2 профілі робочих лопаток мають великий радіус вхідної кромки і спеціальну форму профілю, що надає їм меншу чутливість до кута натікання потоку і до появи відривання пограничного шару від поверхні лопатки.

Запропоноване рішення дозволило підвищити ККД проточної частини турбодетандера на  $\sim 2 - 15\%$  в залежності від режиму експлуатації.

## ВИСНОВКИ

У дисертації поставлена та розв'язана науково-практична задача, що спрямована на підвищення ефективності використання турбодетандерів в технологічних схемах для газової промисловості з метою поліпшення експлуатаційних характеристик газових комплексів.

Рішення цієї задачі дозволило одержати наступні наукові та практичні результати:

1. Вперше запропоновано підхід та розроблено оригінальну схему низькотемпературної сепарації природного газу з використанням турбодетандерних агрегатів для роботи на газових промислах з підводом зі свердловин різного тиску. Застосування запропонованої схеми для низькотемпературної сепарації може підвищити видобуток газу більш ніж на 50 %.

2. Запропоновано принципову схему утилізаційного турбодетандерного агрегату в комплексі з повітряною кліматичною системою для роботи на газорозподільній станції. Економія природного газу за рахунок відсутності підігріву приміщень газовими котлами складе близько 41 тис.м<sup>3</sup> в рік для станції з тепловим споживанням 100 кВт.

3. Вперше запропоновано принципову схему утилізаційного турбодетандерного агрегату з відборами газу для споживачів різного тиску, яка виробляє електроенергії більш ніж у 2 рази при порівнянні зі звичайною конструкцією.

4. Вперше створено метод визначення номінальних параметрів утилізаційної турбодетандерної установки з урахуванням змінних режимів роботи газорозподільної станції, що дозволило збільшити річний виробіток електроенергії на 14 – 40 % у порівнянні зі звичайним підходом, коли в якості номінальних параметрів приймаються значення, усередненні за рік.

5. Розрахунковим шляхом проаналізовано вплив геометрії профілю робочої лопатки на ефективність роботи турбодетандерного агрегату на режимах, відмінних від розрахункового. Використання профілів краплевидної форми дозволяє збільшити ефективність роботи турбодетандера на ~ 2 – 15 % при змінних режимах експлуатації.

6. По темі дисертаційної роботи отримано 1 патент на корисну модель. Матеріали роботи використовуються в ПАТ «Турбогаз» (м. Харків). У даний час вдосконалені конструкції турбодетандерів експлуатуються на газових комплексах України, Білорусі, Узбекистану та інших країн СНД.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Моисеев С.В. Численное моделирование переменных режимов работы ТДА / С.В. Моисеев, А.В. Бурняшев, В.П. Сарапин // Авиационно-космическая техника и технология. - Харьков: ХАИ, 2005. – №8(24). – С. 72-76.

2. Моисеев С.В. Выбор оптимальных номинальных параметров УТДУ для работы на ГРС / С.В. Моисеев, А.В. Бурняшев, В.П. Сарапин // Наукові праці:

Техногенна безпека. – Миколаїв: ЧДУ ім. П. Могили, 2007. - Т. 77, № 64. – С. 49-52.

3. Повышение эффективности работы радиальных турбин за счет профилирования рабочих лопаток / С.В. Моисеев, А.В. Бурняшев, В.П. Сарапин, А.В. Русанов // Энергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Вісник НТУ «ХПІ»: Зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – № 6(1181). – С. 47-51. – ISSN 2078-774X.

4. Шубенко А.Л. Совершенствование схемы низкотемпературной сепарации природного газа для месторождений с разнонапорными скважинами / А.Л. Шубенко, В.П. Сарапин // Проблемы машиностроения. - Харьков: ИПМаш, 2015. – Том 18 4/1. – С. 62-66. – ISSN 0131-2928.

5. Энергосбережение на ГРС при совместной работе турбодетандера и воздушной климатической системы / А.Л. Шубенко, В.П. Сарапин, А.В. Сенецкий, М.В. Сарапина // Гідравлічні машини та гідроагрегати. Вісник НТУ «ХПІ»: Зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 20(1192). – С. 15-19. – ISSN 2411-3441.

6. Пат. 97282 Україна, МПК (2014.01) F25B 11/00, F25J 3/08 Установка низкотемпературной обработки природного газа / Сарапин В.П., Шубенко О.Л.; заявник та патентовласник Ін-т проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України. – № 201409036; заявл. 11.08.2014; опубл. 10.03.2015, Бюл. № 5.: ил.

7. Моисеев С.В. Численное моделирование совместной работы турбины и компрессора на переменных режимах / С.В. Моисеев, А.В. Бурняшев, В.П. Сарапин // X международный конгресс двигателестроителей 13-18 сентября 2005 г. – Харьков-Рыбачье, Украина, 2005. – С. 68-76.

8. Сарапин В.П. Використання тілесних профілів лопаток РК для радіально-вісьових турбодетандерів / В.П. Сарапин // Науково-практична конференція «Енергоефективність, альтернативна енергетика і екологічні проблеми» 20-22 червня 2006 р. – Миколаїв-Коблево, Україна, 2006. – С. 98-106.

9. Сарапин В.П. Вибір оптимальних номінальних параметрів УТДУ для ГРС / В.П. Сарапин // Науково-практична конференція «Енергоефективність, альтернативна енергетика і екологічні проблеми» 20-22 червня 2007 р. – Миколаїв-Коблево, Україна, 2007. – С. 65-71.

10. Шубенко А.Л. Совершенствование схемы низкотемпературной сепарации природного газа для месторождений с разнонапорными скважинами / А.Л. Шубенко, В.П. Сарапин // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования: XV междунар. науч.-техн. конф. 14-17 сент. 2015 г.: сб. докл. – Электрон. дан. – Харьков, ИПМаш НАН Украины, 2015 г. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Загл. с экрана. – 9 с.

## АНОТАЦІЯ

Сарапин В.П. Удосконалення експлуатаційних характеристик турбодетандерних установок, що працюють в системах транспорту природного газу. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки. – Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України. – Харків, 2016.

Дисертацію присвячено вирішенню важливої науково-технічної задачі підвищення ефективності турбодетандерних установок для роботи у газовій промисловості.

У роботі виконано узагальнення літературних джерел з вибору напрямків вирішення цієї проблеми. Проведено аналіз опублікованих робіт, пов'язаних з розрахунком та розробленням принципів схем і конструкцій турбодетандерів.

Запропоновано нові принципові схеми для низькотемпературної сепарації природного газу та утилізаційної турбодетандерної установки.

Запропоновано методику для визначення номінальних параметрів утилізаційної турбодетандерної установки, за яких буде отримана максимальна виробка електричної енергії за рік.

Досліджено вплив геометрії профілів лопаток робочого колеса на ефективність роботи турбодетандера на режимах, відмінних від номінального.

На основі чисельних досліджень запропоновано нову форму профілю лопатки робочого колеса, яка дозволяє отримати більшу ефективність при роботі турбодетандера у широкому діапазоні режимів експлуатації.

Отримані результати дозволяють удосконалювати сучасні принципові схеми та конструкції турбодетандерів з метою підвищення їх економічності.

*Ключові слова:* теплова схема, турбодетандер, низькотемпературна сепарація, робоче колесо, проточна частина, профіль.

## АННОТАЦІЯ

Сарапин В.П. Совершенствование эксплуатационных характеристик турбодетандерных установок, работающих в системах транспорта природного газа. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.16 – турбомашини и турбоустановки. - Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины. – Харьков, 2016.

Диссертация посвящена решению важной научно-технической задачи повышения эффективности турбодетандерных агрегатов для работы в газовой промышленности.

В работе выполнено обобщение литературных источников с выбором направлений решения этой проблемы. Проведен анализ опубликованных работ, связанных с расчетом и разработкой принципиальных схем и конструкций турбодетандеров.

Предложено новые принципиальные схемы для низкотемпературной сепарации природного газа и утилизационной турбодетандерной установки.

Предложено методику для определения номинальных параметров утилизационной турбодетандерной установки, при которых будет получена максимальная выработка электрической энергии за год.

Исследовано влияние геометрии профилей лопаток рабочего колеса на эффективность работы турбодетандера на режимах, отличных от номинального.

На основании численных исследований предложено новую форму профиля лопатки рабочего колеса, которая позволяет получать более высокую эффективность при работе турбодетандера в широком диапазоне режимов эксплуатации.

Полученные результаты позволяют усовершенствовать современные принципиальные схемы и конструкции турбодетандеров с целью увеличения их экономичности.

*Ключевые слова:* тепловая схема, турбодетандер, низкотемпературная сепарация, рабочее колесо, проточная часть, профиль.

## ABSTRACT

Vladimir Sarapin Improvement of performance of turbo-expander units operating in natural gas transportation systems. - As manuscript.

Dissertation for competition of Scientific Degree of Candidate of Engineering Sciences, Specialty 05.05.16 – Turbo-machines and Turbine Installations. – A.M. Pidhorny Institute for Mechanical Engineering Problems of National Academy of Sciences of Ukraine. – Kharkov, 2016.

The thesis is devoted to solution of important scientific and technical problem of increasing the efficiency of turboexpanders for operation in gas industry.

The study focuses on synthesis of references with a choice of ways to solve this problem. It carries out analysis of published papers related to calculation and development of turboexpander concepts and designs.

New basic schemes are proposed for low-temperature natural gas separation and power recovery turboexpanders.

A methodology is offered for determining the nominal parameters of the power recovery turboexpander which will yield maximum annual power generation.

Influence of the impeller blade profile geometry on the efficiency of the turboexpander at modes other than the nominal was analyzed.

Based on numerical studies there was proposed a new form of the impeller blade profile which allows to obtain a higher efficiency of turbine expanders in a wide range of operating conditions.

The obtained results allow improving modern basic concepts and designs of turboexpanders for increase of their economical operation.

*Keywords:* heat balance diagram, turboexpander, low-temperature separation, impeller, flowing channel, profile.

Підписано до друку 29.06.16. Папір офсетний.  
Формат 60x90/16. Наклад 100 прим. Зам. № 06/69.  
Віддруковано в друкарні ТОВ «Цифра Принт»  
на цифровому лазерному комплексі Xerox DocuTech 6135.  
Свідоцтво про держреєстрацію А01 № 432705 від 3.08.09 р.  
Адреса: м. Харків, вул. Культури, 22-Б. Тел. (057) 786-18-60.

