

# ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООВОГО СТАНУ КОЖУХА ДЛЯ ШУМОТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА ДГ90Л2 У СКЛАДІ ТУРБОБЛОКА АГРЕГАТУ ТИПУ ГПА-Ц-16С

*Представлені методика та результати експериментального дослідження теплового стану кожуха для шумотеплоізоляції газотурбінного двигуна ДГ90Л2 у складі турбоблока газоперекачувального агрегату ГПА-Ц-16С. Виявлені розподіли температур повітря та внутрішніх поверхонь стінок кожуха та вплив теплового випромінювання від двигуна на тепловий стан кожуха. Отримані дані є придатними для верифікації математичної моделі теплового стану кожухів*

*Ключові слова: газоперекачувальний агрегат, газотурбінний привід, кожух для шумотеплоізоляції, тепловий стан, температурні вимірювання*

*Представлены методика и результаты экспериментального исследования теплового состояния кожуха шумотеплоизолирующего газотурбинного двигателя ДГ90Л2 в составе турбоблока газоперекачивающего агрегата ГПА-Ц-16С. Выявлены распределения температур воздуха и внутренних поверхностей стенок кожуха и влияние теплового излучения от двигателя на тепловое состояние кожуха. Полученные данные пригодны для верификации математической модели теплового состояния кожухов*

*Ключевые слова: газоперекачивающий агрегат, газотурбинный привод, шумотеплоизолирующий кожух, тепловое состояние, температурные измерения*

**О. М. Щербаков**

Кандидат технічних наук, провідний інженер-конструктор\*

E-mail: scherbakov\_o@frunze.com.ua

**Д. О. Ткаченко**

Начальник відділу\*

E-mail: tkachenko\_d@frunze.com.ua

**В. П. Парафійник**

Доктор технічних наук, старший науковий співробітник\*\*

E-mail: spazha-2008@mail.ru

**В. М. Гуріненко**

Начальник компресорної станції

Долинське лінійне виробниче управління магістральних газопроводів

ПАТ «Укртрансгаз» філія УМГ «Прикарпаттрансгаз» с. Княжолука, Івано-Франківська обл., Україна, 77540

E-mail: gurinenko-vm@utg

**В. Є. Костюк**

Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник\*\*\*

E-mail: kostyuk.v@mail.ru

**О. І. Скрипка**

Кандидат технічних наук, доцент\*\*\*

E-mail: aedlab@gmail.com

**О. І. Кириш**

Молодший науковий співробітник\*\*\*

E-mail: kirilash-elena@rambler.ru

\*Відділ турбоблоків\*\*

\*\*ПАТ «Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання» вул. Горького, 58, м. Суми, Україна, 40004

\*\*\*Кафедра конструкції авіаційних двигунів

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

вул. Чкалова, 17, м. Харків, Україна, 61070

## 1. Вступ

Однією з принципових конструктивних особливостей газоперекачувальних агрегатів (ГПА) типу ГПА-Ц, що створені на базі конвертованих газотурбінних двигунів (ГТД) авіаційного та суднового

типів, є розміщення двигуна у складі турбоблока агрегату в спеціальному кожусі для шумотеплоізоляції (КШТ), обладнаному системою механічної вентиляції. В конструкціях ГПА, що створюються в ПАТ «Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання» (Україна) (далі СМНВО), турбоблок

розташовують на єдиній фундаментній рамі, яку використовують для розміщення приводного ГТД, відцентрового компресора (ВК), а також елементів вихлопного тракту, систем – змащування та ущільнення, паливної, автоматизованої системи керування (АСК) та інших елементів агрегату.

У зв'язку зі створенням СМНВО уніфікованих турбоблоків, на основі яких розробляють агрегати не тільки блоково-контейнерного, але й ангарного типу (в індивідуальних укриттях індустріального виконання), для ГТД створюють уніфіковані конструкції КШТ, що забезпечують надійну експлуатацію двигунів потужністю 6,3...25 МВт у складі ГПА різного призначення. КШТ є складною та відповідальною системою ГПА, оскільки він має забезпечувати:

- зниження рівня шуму, що створює ГТД, з метою виконання вимог норм охорони праці;

- захист людей від впливу високих температур з боку ГТД;

- потрібні температурні умови роботи ГТД і допоміжного обладнання, що встановлені всередині КШТ (зокрема, контрольно-вимірювальних приладів, датчиків системи пожежної сигналізації та контролю загазованості, світильників, трубопроводів гідравлічних систем, кабельних трас та ін.);

- надійну роботу системи змащування ГПА та ущільнень ВК в широкому діапазоні температур довольтного середовища (–55...+45 °С);

- ефективну роботу системи пожежогасіння та вибухозахисту ГПА в разі виникнення аварійних ситуацій за рахунок правильного вибору типу датчиків і місць їх розташування у відповідних зонах робочого простору в КШТ.

У зв'язку із викладеним вище фахівці Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» (далі НАКУ «ХАІ») розробили узагальнену математичну модель (ММ) теплового стану КШТ [1] і методику його аналізу із застосуванням програмного комплексу ANSYS Fluent [2].

Для отримання експериментальних даних, що забезпечують верифікацію ММ, фахівці СМНВО разом із фахівцями НАКУ «ХАІ» провели на компресорній станції «Долина» натурні дослідження теплового стану КШТ у складі турбоблока блоково-контейнерного агрегату ГПА-Ц-16С/76-1,45.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка питання

Найбільш масштабні роботи з дослідження впливу теплових процесів на надійність обладнання здійснені, як відомо, в галузі авіаційної та ракетно-космічної техніки. Це зумовлено, зокрема, тим, що, згідно [3], при експлуатації бортового авіаційного обладнання близько 55 % його відмов є наслідком дії підвищених температур.

Від конструктивних особливостей та режимів роботи укриттів-контейнерів істотно залежить також ефективність радіоелектронного обладнання, яке використовують у радіотехнічних системах різного призначення [4].

Однак специфічність конструкцій та умов експлуатації обладнання, розглянутих у вказаних роботах, не дозволяють використовувати отримані результати при

проектванні ГПА. У зв'язку з цим доцільно більш ретельно проаналізувати результати робіт, в яких йдеться про дослідження різними методами теплового стану укриттів ГТД, що використовують у якості механічного приводу [5–20].

Традиційними методами дослідження теплового стану таких укриттів є термометрування та тепловізійна зйомка в комбінації з анемометрією та візуалізацією течії вентиляційного повітря (ВП) [5, 7, 14, 15, 17]. Різні автори вимірювали параметри ВП в характерних точках усередині укриття [5–7, 11, 15, 18], у вхідних [18] і вихідних [13, 15] вентиляційних каналах. Для вимірювання температури ВП застосовували термометри опору та термопари [5–7, 11, 13, 15, 18], для вимірювання температури поверхонь корпусу ГТД [6, 7, 11] та стінок укриття [5, 6, 13, 14] – термопари [7, 11] та тепловізори [5–7, 11, 13, 18]. Автори робіт [6, 17] зазначали, що тепловізори надають повну картину розподілу температур поверхонь твердих тіл, але на практиці виникають труднощі з кількісною інтерпретацією результатів, зумовлені необхідністю знання коефіцієнтів випромінювання поверхонь та складнощами користування тепловізором в обмеженому просторі укриття.

Швидкість ВП вимірювали чашковими [15], термічними [18] та ультразвуковими [17, 18] анемометрами. Візуалізацію течії ВП здійснювали штучним димом і ворсинками [17, 19, 20].

Автори робіт [6, 17] вказували на такий недолік традиційних методів дослідження теплового стану укриття ГТД оператором-вимірювачем, який заходить всередині, як недосяжність певних зон КШТ внаслідок вимог експлуатаційної безпеки. Щоб виключити присутність людини в укритті, використовують дистанційні датчики із системою реєстрації даних [17].

Автори роботи [6] наголошували на великих витратах на повторну розробку КШТ у разі виявлення несприятливого теплового стану та його причин суто експериментальним шляхом під час випробувань ГПА та підкреслювали доцільність застосування методів обчислювальної газодинаміки (CFD – Computational Fluid Dynamics) для попереднього аналізу теплового стану КШТ.

Вперше таке CFD-моделювання теплового стану укриття ГТД у складі ГПА виконали у 1997 році за допомогою комп'ютерної програми PHOENICS автори роботи [16]. З того часу багато авторів досліджували теплообмін в укриттях ГТД методами CFD. Відомо, що CFD-моделі складних індустріальних об'єктів потребують кропіткої верифікації. Тому автори порівнювали результати власних розрахунків з результатами вимірювань, що були виконані в натурному укритті [5–7, 9, 14, 15, 18] або в його зменшеній моделі [10].

Наприклад, автори роботи [10] виконали числове та експериментальне дослідження зменшеної моделі (масштаб 1:6) укриття ГТД Titan 130 (Solar Turbines) номінальною потужністю 19 500 к.с., який є, як і в нашому випадку, приводом компресора природного газу. Температури поверхонь двигуна, прийняті авторами як теплові граничні умови в CFD-моделі, були отримані в результаті термометрування корпусу реального ГТД із використанням тепловізора. Імітація температур поверхонь двигуна при випробуваннях моделі здійснювалась шляхом нагрівання намотаних на модель силіконових нагрівачів з імплантованими

електричними дротами. Для верифікації результатів числового дослідження були використані методи візуалізації течії ВП за допомогою диму та ворсинок у комбінації анемометрії та вимірювань температур із застосуванням термопар і тепловізора. Термопари Т-типу (мідь – константан) були встановлені в 10 ключових точках усередині моделі укриття. Термометрування корпусу моделі двигуна також було виконано із застосуванням тепловізора. Очевидним недоліком роботи є те, що фізичне моделювання обмежене складністю об'єкта та складнощами забезпечення умов подібності.

Автори робіт [5, 13, 14] виконали порівняльний аналіз результатів числового моделювання процесу вентиляції простору всередині КШТ із даними натурних вимірювань, здійснених для агрегатів типу ГПА-12РС і ГПА-25РПС-01 конструкції ПАТ НВО «Іскра» (м. Перм, Росія). Для КШТ агрегату ГПА-12РС була проведена тепловізійна зйомка зовнішньої поверхні стінок КШТ. При цьому крізь шпарини у прорізах для дверей з-під КШТ назовні надходило ВП, температура якого, на думку авторів, була зафіксована тепловізором. Для агрегату ГПА-25РПС-01 вимірювання температури ВП виконували безпосередньо у просторі КШТ. Результати числового моделювання автори порівнювали із даними вимірювань температур зовнішньої поверхні стінок КШТ агрегату ГПА-12РС в одній точці; повітря, що надходило з-під КШТ цього агрегату, в чотирьох точках; повітря, що знаходилось безпосередньо у просторі КШТ агрегату ГПА-25РПС-01 – у двох точках. Недоліками роботи є відсутність у її авторів підстав вважати зафіксовану тепловізором температуру поверхонь твердих тіл, що розташовані біля шпарин у прорізах для дверей КШТ, рівною температурі ВП, що надходило назовні, відсутність вимірювань температури внутрішньої поверхні стінок КШТ та непереконливість доведення адекватності ММ шляхом порівняння розрахункової та вимірної температур зовнішньої поверхні стінок КШТ лише в одній точці, та порівняння розрахункових і коректно вимірних температур ВП лише у двох точках простору всередині КШТ.

Автор роботи [15] для верифікації розроблених ММ використав результати натурних вимірювань температур ВП в чотирьох точках в КШТ агрегату типу ГПА-25РПС «Урал», що виконані за допомогою термопар. Витрату ВП, що подається в КШТ, вимірювали за допомогою чашкового анемометра. Недоліками роботи є відсутність вимірювань температури стінок КШТ та непереконливість доведення автором адекватності ММ лише шляхом порівняння розрахункових та вимірних температур ВП в чотирьох точках простору всередині КШТ.

Враховуючи складність картини обтікання ВП ГТД, розрахункова температура корпусних деталей якого може змінюватись в діапазоні від мінус 40 °С до плюс 650 °С, питання верифікації ММ теплового стану КШТ видається доволі складним. Обмежені експериментальні дані, що містять роботи [5–7, 9, 14, 15, 18], не відображають належним чином тепловий стан КШТ, а результати та методичні особливості роботи [10], незважаючи на її комплексний характер, не можна запровадити для верифікації ММ теплового стану КШТ, що застосовують для вітчизняних та іноземних двигунів у складі ГПА конструкції СМНВО. Це зумовлено не тільки різницею конструкції ГТД і КШТ, але й приблизністю рішень, пов'язаних з моделюванням теплового стану ГТД відомими методами.

З урахуванням наведеного вище ми прийняли рішення здійснити натурний експеримент з термометрування КШТ ГТД ДГ90Л2 у складі агрегату типу ГПА-Ц-16С за програмою та методикою, які дозволять отримати саме такі експериментальні дані, що потрібні для верифікації ММ теплового стану КШТ, і не матимуть тих недоліків, що властиві відомим дослідженням.

### 3. Мета і завдання дослідження

Метою роботи є отримання експериментальних даних про тепловий стан КШТ ГТД ДГ90Л2 у складі агрегату типу ГПА-Ц-16С, що за своєю якістю і кількістю є достатніми для підтвердження адекватності ММ теплового стану КШТ [1, 2].

Досягнення названої мети потребувало вирішення таких завдань:

- обстежити об'єкт дослідження теплового стану щодо виявлення бажаних і можливих місць розташування датчиків вимірювання температури та встановлення доцільного режиму роботи агрегату;
- розробити програму та методику експериментального дослідження теплового стану КШТ;
- здійснити експериментальне дослідження теплового стану КШТ та виконати аналіз отриманих результатів щодо їхньої відповідності відомим фізичним уявленням, досвіду експлуатації ГПА та їхньої придатності для верифікації ММ [1, 2];
- сформулювати напрямки подальших досліджень.

### 4. Об'єкт дослідження теплового стану

Загальний вигляд досліджуваного КШТ у складі турбоблока ГПА показаний на рис. 1.

Як видно з рис. 1, КШТ 3 разом із приводним ГТД 2 і газовідвідним пристроєм 4 встановлені на єдиній фундаментній рамі 1. Каркас стінок і даху КШТ виконаний з профільного прокату та обшитий із зовнішнього боку суцільним сталевим листом, а з внутрішнього – перфорованим сталевим листом, вкритим термостійкою ґрунт-емаллю сріблястого кольору. Порожнини між листами заповнені теплозвукоізоляційним матеріалом на основі базальтового волокна. На бічних стінках КШТ є люки для забезпечення доступу обслуговуючого персоналу до обладнання, що встановлене в КШТ, при проведенні технічного обслуговування.

ВП подається в КШТ по повітропроводу 5 із застосуванням двох осьових вентиляторів ВОД1 і ВОД2 потужністю 11 кВт кожний, що встановлені в блоці вентиляції (рис. 2). Блок вентиляції змонтований на даху турбоблока. Регулювання витрати ВП здійснюється за рахунок увімкнення-вимкнення одного з вентиляторів.

Для підведення ВП до найбільш нагрітих поверхонь ГТД передбачений екран, що його направляє 6 (рис. 1). Нагріте повітря скидається з КШТ в атмосферу крізь отвори з шумоглушниками 7.

Усередині КШТ встановлені також дифузор системи вихлопу агрегату, трубопроводи підведення паливного газу й оливи, паливна та регулююча апаратура, трубопроводи системи пожежогаасіння, елементи системи освітлення, а також датчики АСК та системи захисту агрегату, що детально описані в [2].

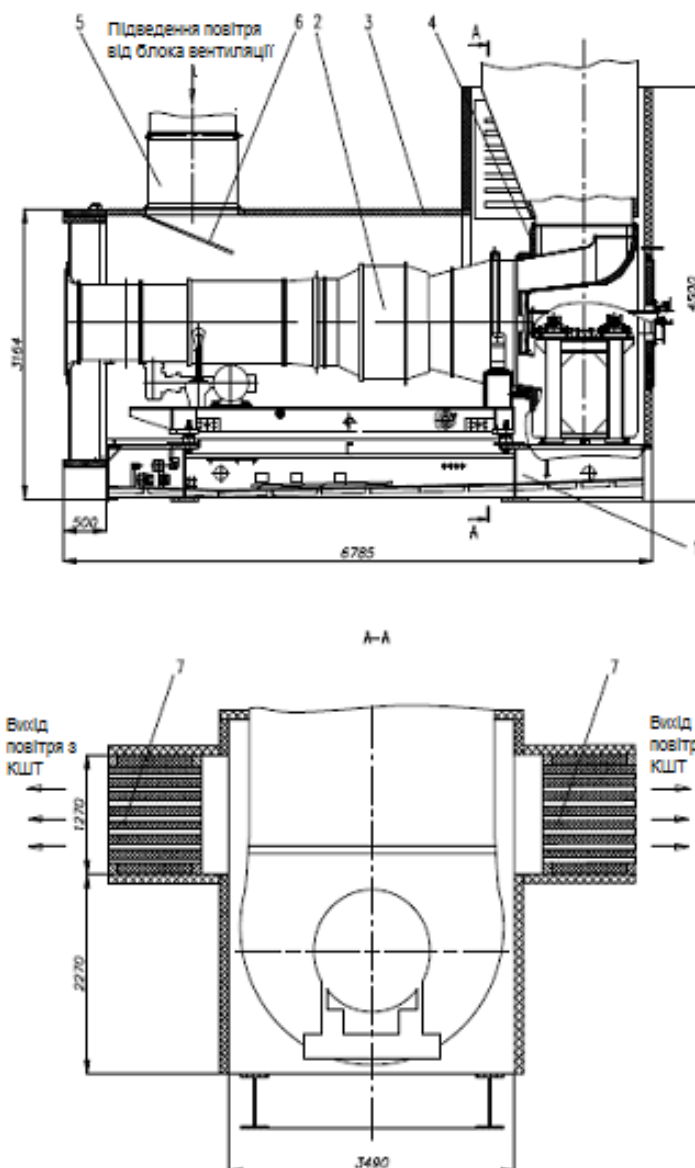


Рис. 1. Загальний вигляд КШТ і обладнання, розташованого всередині: 1 – фундаментна рама; 2 – ГТД ДГ90Л2; 3 – КШТ; 4 – газовідвідний пристрій; 5 – повітропровід підведення ВП; 6 – екран, що направляє ВП; 7 – шумоглушник

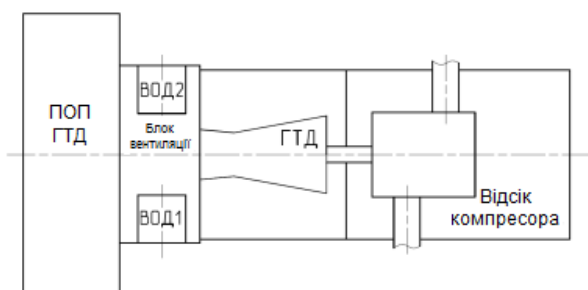


Рис. 2. Схема розташування вентиляторів системи вентиляції КШТ (вид зверху)

**5. Програма та методика експериментального дослідження теплового стану кожуха**

Програма та методика цього дослідження сформовані з урахуванням граничних умов, що застосовані в

ММ, і попередніх результатів обчислювального експерименту [1, 2], особливостей режимів експлуатації ГПА в складі КС, а також експериментальних можливостей організацій-виконавців.

**5. 1. Методи та засоби вимірювань**

Для визначення теплового стану КШТ під час експериментального дослідження вимірювали:

- режимні та технологічні параметри роботи ГПА (по ГТД – температуру повітря на вході в двигун, частоти обертання роторів компресора низького тиску (КНТ), компресора високого тиску (КВТ), вільної турбіни (ВТ), тиск за КВТ; по ВК – тиск і температуру газу на вході та виході, витрату газу, що транспортується);
- температуру ВП всередині КШТ;
- температуру внутрішніх поверхонь стінок КШТ;
- температуру повітря зовні КШТ (у відсіку двигуна агрегату);
- масову витрату ВП, що надходила в КШТ;
- момент часу проведення замірів температури.

Вимірювання температур ВП всередині КШТ і внутрішніх поверхонь стінок КШТ виконували із застосуванням багатоканальної інформаційно-вимірювальної системи (ІВС). Структурна схема ІВС показана на рис. 3.

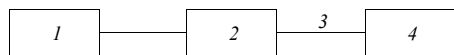


Рис. 3. Структурна схема ІВС: 1 – первинний вимірювальний перетворювач (ПВП); 2 – перемикач вибору точок вимірювання; 3 – лінія зв'язку; 4 – засіб обробки та надання інформації

Аналоговий сигнал, що виробляє ПВП 1, через перемикач вибору точок вимірювання 2 та лінію зв'язку 3 подавався на засіб обробки та надання інформації 4.

В якості ПВП температури застосовували термоелектричні перетворювачі типу ТХА. Для запобігання впливу інфрачервоного випромінювання на покази датчиків температури виконували їх екранування. Конструкція використаних датчиків та їх зовнішній вигляд після встановлення в КШТ показані на рис. 4 і 5 відповідно.

Для почергового підключення ПВП до засобу обробки та надання інформації був застосований перемикач вибору точок вимірювання ПТВ-М. Як засіб обробки та надання інформації використовували одноканальний цифровий термометр Technoterm 9503 (Німеччина) з максимальною абсолютною похибкою вимірювання температури  $\pm 6,5^\circ\text{C}$ . Температури ВП всередині КШТ вимірювали в 23 точках, температури внутрішніх поверхонь стінок КШТ – в 14 точках. Схема розташування точок вимірювання показана на рис. 6.

Масову витрату ВП, що надходить в КШТ, визначали непрямим методом за вимірами середньої швидкості повітряного потоку на вході в КШТ, температури ВП на вході в КШТ, надлишкового тиску в КШТ і атмосферного тиску. Вимірювання середньої швидкості повітряного потоку виконували з використанням чашкового анемометра МС-13 з абсолютною похибкою вимірювання  $\pm(0,3+0,05V)$ , де  $V$  – виміряна швидкість потоку, м/с.

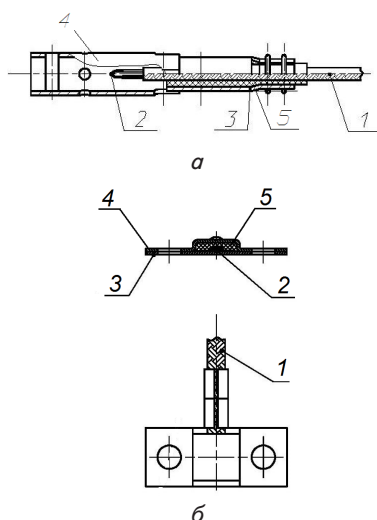
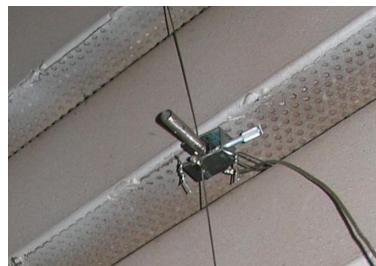
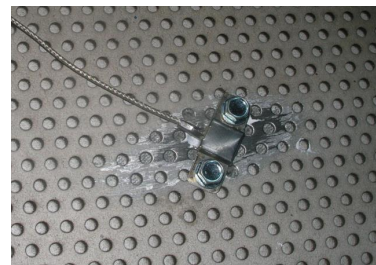


Рис. 4. Конструкція датчиків: а – датчик вимірювання температури ВП всередині КШТ; б – датчик вимірювання температури внутрішньої поверхні стінок КШТ; 1 – термоелектродний дріт; 2 – слай; 3 – корпус; 4 – екран; 5 – теплоізоляційний матеріал



а



б

Рис. 5. Зовнішній вигляд датчиків: а – датчик вимірювання температури ВП всередині КШТ; б – датчик вимірювання температури внутрішньої поверхні стінок КШТ

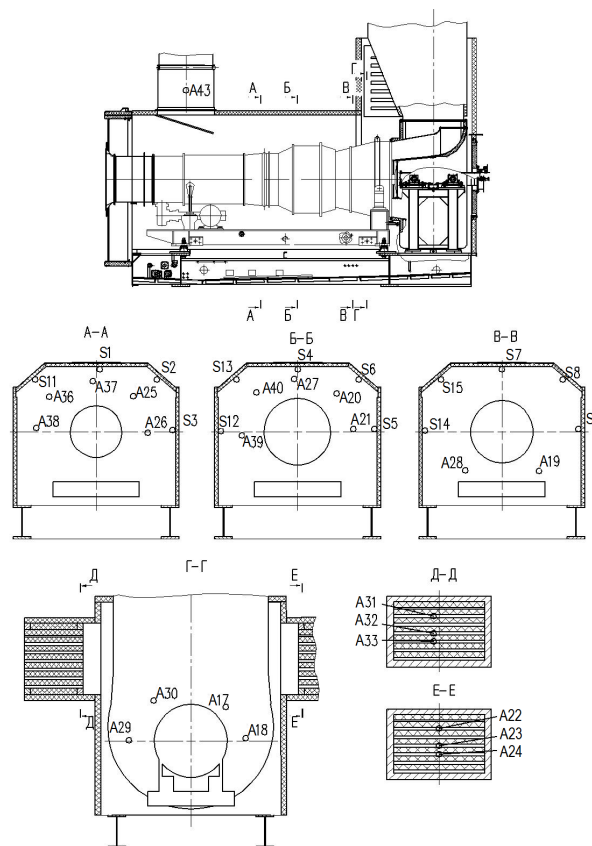


Рис. 6. Схема розташування датчиків вимірювання температури в КШТ: А – датчик вимірювання температури ВП всередині КШТ; S – датчик вимірювання температури внутрішньої поверхні стінок КШТ

## 5. 2. Підготовка та проведення випробувань

Встановлення датчиків вимірювання температури ВП всередині КШТ здійснювали таким чином, щоб

виключити пряме потрапляння теплових променів на чутливий елемент датчика крізь отвір в його корпусі. Щоб запобігти коливанням датчиків внаслідок дії повітряного потоку, що набігає, датчики всередині КШТ фіксувались за допомогою дровових розтяжок.

Датчики вимірювання температури внутрішньої поверхні прикріплювали до перфорованої стінки КШТ за допомогою шурупів. Тепловий контакт з поверхнею забезпечувався щільним притисканням робочої ділянки датчика до поверхні стінки КШТ. Щоб запобігти утворенню повітряного проміжку між робочою ділянкою датчика та поверхнею стінок, місця встановлення датчиків попередньо зачищали, а датчики встановлювали на термопасту.

Вимірювання витрати ВП, що надходить в КШТ, здійснювали на агрегаті, що не працює. Для цього вмикали по черзі один і два вентилятори та виконували відповідні вимірювання середньої швидкості потоку ВП та температури ВП на вході в КШТ.

Після запуску ГПА та виходу його на сталий режим здійснювали запис режимних параметрів роботи агрегату, а також виконували заміри температури внутрішньої поверхні стінок КШТ, температури ВП всередині КШТ і температури повітря у відсіку двигуна (зовні КШТ).

Випробування виконували при трьох режимах роботи системи вентиляції: при увімкненні по черзі вентиляторів ВОД1 і ВОД2, а також при сумісній роботі двох вентиляторів.

### 6. Результати експериментального дослідження

У процесі випробувань отримано великий об'єм інформації щодо теплового стану КШТ. З огляду на обмежений обсяг цієї публікації в роботі надані результати, які були отримані для одного з режимів роботи системи вентиляції (при роботі одного вентилятора ВОД2) (рис. 7, табл. 1, 2). Цей режим найбільше відповідав сталому. Наробіток агрегату від моменту запуску до моменту проведення вимірів становив близько 18 годин. Режимні параметри роботи агрегату при проведенні цього експерименту були такі: частота обертання ротора ВТ – 4273 об/хв; частота обертання ротора КНТ – 6310 об/хв; частота обертання ротора КВТ – 8500 об/хв; тиск повітря за КВТ – 11,7 кгс/см<sup>2</sup>; температура повітря на вході в ГТД – 20,3 °С; середня температура газів за ТНТ (перед ВТ) – 552 °С; тиск газу на вході у ВК – 37,0 кгс/см<sup>2</sup>; тиск газу на виході з ВК – 46,5 кгс/см<sup>2</sup>; температура газу на вході у ВК – 15,2 °С; температура газу на виході з ВК – 35,2 °С.

Результати вимірювання температури повітря всередині КШТ та температури поверхні стінок КШТ показані на рис. 7 та в табл.1, 2. При вимірюванні параметрів теплового стану температура повітря на вході в КШТ становила 25,3 °С (точка А43), температура повітря в лівому відсіку двигуна – 32,0 °С, в правому – 34,5 °С, масова витрата вентиляційного повітря – 6,1 кг/с.

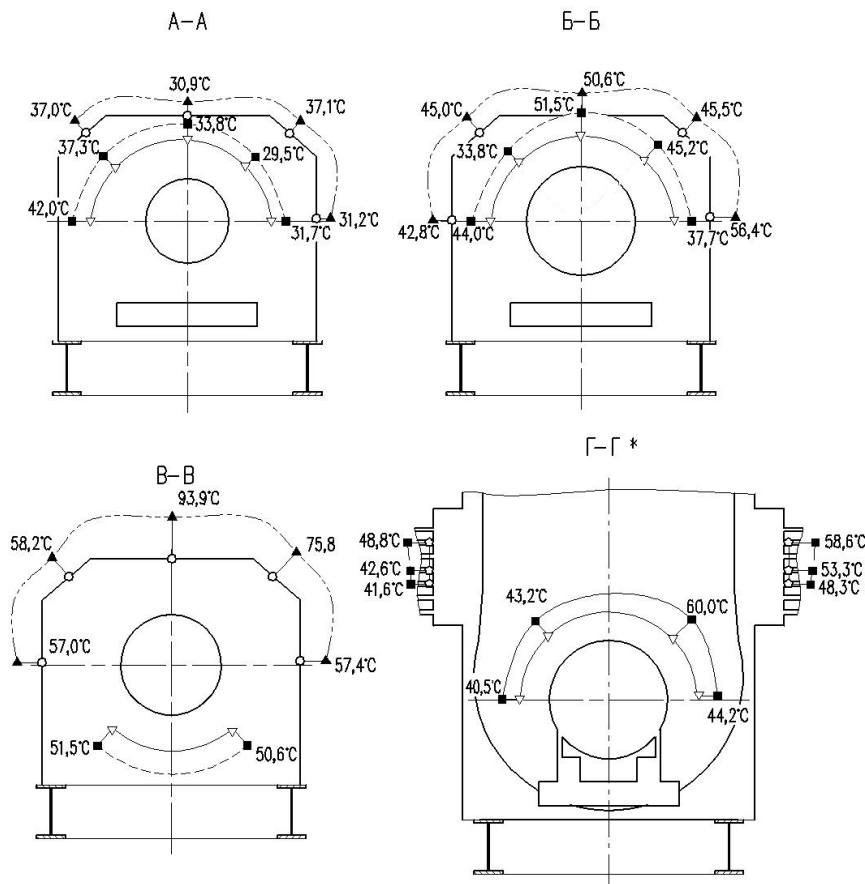


Рис. 7. Результати вимірювання температури ВП всередині КШТ та температури внутрішніх поверхонь стінок КШТ:

▽ – датчики вимірювання температури ВП всередині КШТ; ○ – датчики вимірювання температури внутрішніх поверхонь стінок КШТ; ■ – температура ВП всередині КШТ; ▲ – температура внутрішніх поверхонь стінок КШТ;

\* додатково також надані результати вимірювання температур ВП в перерізах Д-Д та Е-Е

Таблиця 1

Результати вимірювання температури ВП всередині КШТ

Точка	t, °C	Точка	t, °C	Точка	t, °C	Точка	t, °C
A17	60,0	A23	53,3	A29	40,5	A37	33,8
A18	44,2	A24	48,3	A30	43,2	A38	42,0
A19	50,6	A25	29,5	A31	48,8	A39	44,0
A20	45,2	A26	31,7	A32	42,6	A40	33,8
A21	37,7	A27	51,5	A33	41,6	-	-
A22	58,6	A28	51,5	A36	37,3	-	-

Таблиця 2

Результати вимірювання температури внутрішніх поверхонь стінок КШТ

Точка	t, °C	Точка	t, °C	Точка	t, °C	Точка	t, °C
S1	30,9	S5	56,4	S9	57,4	S14	57,0
S2	37,1	S6	45,5	S11	37,0	S15	58,2
S3	31,2	S7	93,9	S12	42,8	-	-
S4	50,6	S8	75,8	S13	45,0	-	-

Як видно з рис. 7, розподіл температури ВП навколо ГТД і температури поверхонь стінок КШТ у всіх перерізах відрізняється нерівномірністю. Цей факт можна пояснити несиметричним обтіканням корпусу ГТД, що спричинено боковим розташуванням вентилятора обдування двигуна (рис. 2) та складною структурою течії ВП всередині КШТ. При цьому слід зазначити, що характер нерівномірності температур ВП та поверхонь вздовж осі ГТД не зберігається. Так, в місці розташування перехідника між корпусами КНТ і КВТ (переріз А-А) температура ВП вища з боку правої стінки КШТ (при погляді з боку ЦК, рис. 2), а поблизу газовідвідного пристрою (переріз Г-Г) – з боку лівої стінки. Максимальні температури ВП були зафіксовані в місці розташування корпусу ВТ і в шумоглушнику на виході ВП з КШТ (точки А17 і А22 відповідно, табл. 1). В перерізах, що розташовані поблизу найбільш нагрітих ділянок корпусу ГТД, температури поверхонь стінок КШТ вищі ніж температури ВП, що підтверджує істотний вплив теплового випромінювання на тепловий стан КШТ. Максимальну температуру внутрішньої поверхні має дах КШТ (точка S7, табл. 2). Максимальні температури внутрішніх поверхонь стінок КШТ зафіксовані в місці розташування корпусу ВТ (точки S9 і S14, табл. 2). Слід зазначити, що внутрішня поверхня лівої стінки КШТ нагріта більше за праву.

Значний об'єм експериментальних даних, отриманих у процесі випробувань, потребує їх поглибленого аналізу, що буде виконано в подальшому при верифікації ММ.

## 7. Висновки

1. Виходячи з конструкцій і правил експлуатації досліджуваного КШТ, його системи вентиляції та обладнання, що знаходиться всередині КШТ, і враховуючи граничні умови, що застосовані в ММ [1, 2], попередні результати обчислювального експерименту [2] та експериментальні можливості організацій-виконавців цього дослідження, було визначено місця розташування 23 точок вимірювання температури ВП

всередині КШТ та 14 точок вимірювання температури внутрішніх поверхонь стінок КШТ за допомогою відповідних датчиків та встановили за доцільний такий режим роботи агрегату, що найбільш відповідає сталому.

2. В рамках розробленої програми та методики експериментального дослідження теплового стану КШТ ми створили багатоканальну ІВС, до складу якої включили виконані на основі термоелектричних перетворювачів типу ТХА захищені від впливу інфрачервоного випромінювання датчики вимірювання температури власної конструкції, перемикач вибору точок вимірювання ПТВ-М та цифровий термометр Technoterm 9503. За допомогою цієї ІВС виміряли при трьох режимах роботи системи вентиляції температуру ВП всередині КШТ, температуру внутрішніх поверхонь стінок КШТ і температуру повітря зовні КШТ. Датчики вимірювання температур фіксували всередині КШТ за допомогою дровових розтяжок або прикріплювали до стінки КШТ за допомогою шурупів. Масову витрату ВП, що надходило в КШТ, визначали непрямым методом на агрегаті, що не працює, за вимірами середньої швидкості повітряного потоку на вході в КШТ з використанням чашкового анемометра МС-13, температури ВП на вході в КШТ, надлишкового тиску в КШТ і атмосферного тиску.

3. За розробленою програмою та методикою експериментального дослідження визначили тепловий стан кожуха для шумотеплоізоляції ГТД ДГ90Л2 у складі турбоблока блоково-контейнерного агрегату ГПА-Ц-16С/76-1,45 виробництва СМНВО, що експлуатується у складі КС «Долина» Долинського ЛВУМГ «Прикарпаттрансгаз». Результати експериментального дослідження можуть бути використані для верифікації розробленої ММ теплового стану КШТ. Згідно з отриманими результатами, розподіли температур ВП та внутрішніх поверхонь стінок КШТ характеризуються нерівномірністю, яка спричинена особливостями конструкції системи вентиляції. Крім того, отримані результати підтвердили, що теплове випромінювання від ГТД істотно впливає на тепловий стан КШТ.

4. Враховуючи залежність теплового стану ГТД і КШТ від режимів роботи ГПА, температури навколишнього середовища та режимів роботи системи вентиляції КШТ, доцільне продовжити такі експериментальні дослідження в натурних умовах. Це має важливе значення як з точки зору формування експериментальних даних про роботу ГТД при різних режимах його роботи, так і з точки зору можливої мінімізації кількості точок вимірювання. При подальших дослідженнях теплового стану двигуна та КШТ доцільно здійснити поелементне термометрування розташованого всередині КШТ обладнання, що виділяє тепло (ГТД, газовідвідного пристрою і т. д.), з урахуванням режимів роботи системи вентиляції КШТ, а також термометрування КШТ з використанням ІВС, яка побудована на основі багатоканального вимірювача-реєстратора. Окрім того, доцільно виконати індикацію та вимірювання параметрів можливих витоків високотемпературного робочого тіла з нещільностей клапанів перепуску повітря, фланцевих з'єднань корпусних деталей ГТД, газовідвідного пристрою та муфти всередину КШТ.

## Література

1. Костюк, В. Е. Обобщённая математическая модель теплового состояния укрытий газотурбинных установок [Текст] / В. Е. Костюк, Е. И. Кириладш, А. Л. Кравчук // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2013. – № 1. – С. 22–26.
2. Смирнов, А. В. Обеспечение теплового режима силового блока газоперекачивающего агрегата организованной подачей воздуха под шумотеплоизолирующий кожух газотурбинного двигателя [Текст] / А. В. Смирнов, В. Е. Костюк, Д. А. Ткаченко, Е. И. Кириладш, Ю. Н. Слабко // Вестник двигателестроения. – 2013. – № 2. – С. 99–107.
3. Николаев, В. Н. Математическое моделирование теплового состояния отсеков и систем самолета при проектировании и летных испытаниях [Текст] / В. Н. Николаев. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2010. – 252 с.
4. Ткаченко, В. Б. Наукові основи створення та вдосконалення систем терморегулювання транспортних комплексів радіоелектронної апаратури [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В. Б. Ткаченко. – Одеса, 2002. – 35 с.
5. Трусов, П. В. Численные исследования процесса вентиляции и теплового состояния шумотеплозащитных кожухов газотурбинных установок с использованием параллельных вычислений [Текст] / П. В. Трусов, Д. А. Чарнцев // Вычислительная механика сплошных сред. – 2012. – Т. 5, № 2. – С. 208–216.
6. Клочков, А. В. Обеспечение взрывозащиты газотурбинного оборудования [Текст] / А. В. Клочков, Е. С. Корнилова, А. А. Снитко // Газотурбинные технологии. – 2005. – № 8. – С. 20–22.
7. D'Ercole, M. Results and Experience from Ge Energy's MS5002E Gas Turbine Testing and Evaluation [Text] / M. D'Ercole, G. Biffaroni, F. Grifoni, F. Zanobini, P. Pecchi // Proceedings of ASME TurboExpo 2005. – Reno, Nevada, USA, 2005. – 9 p. doi: 10.1115/gt2005-68053
8. Ponnuraj, B. 3D CFD Analysis of an Industrial Gas Turbine Compartment Ventilation System [Text] / B. Ponnuraj, B. Sultanian, A. Novori, P. Pecchi // Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress (IMECE'03). – Washington, D.C., USA, 2003. – P. 67–76. doi: 10.1115/imece2003-41672
9. Graf, E. Design Improvements Suggested by Computational Flow and Thermal Analyses for the Cooling of Marine Gas Turbine Enclosures [Text] / E. Graf, T. Luce, F. Willet // Proceedings of ASME TurboExpo 2005. – Reno, Nevada, USA, 2005. – 7 p. doi: 10.1115/gt2005-68574
10. Vahidi, D. Numerical and Experimental Study of Ventilation for Turbine Package Enclosure [Text] / D. Vahidi, H. Bagheri, B. Glezer // Proceedings of ASME TurboExpo 2006. – Barcelona, Spain, 2006. – 10 p. doi: 10.1115/gt2006-90960
11. Д'Эрколе, М. Новая газовая турбина MS5002E: испытания первого агрегата / М. Д'Эрколе, Ф. Тринча // Газотурбинные технологии. – 2006. – № 3. – С. 6–11.
12. Popescu, J. A. Numerical simulation to determine ejection device geometry for turbo-shaft driven water pump [Text] / J. A. Popescu, R. Petcu, V. A. Vilag, I. Vataman, V. Silivestru // Proceedings of ASME TurboExpo 2008. – Berlin, Germany, 2008. – 8 p. doi: 10.1115/gt2008-50968
13. Трусов, П. В. Исследование структуры течения охлаждающего воздуха в шумотеплозащитном кожухе газотурбинной установки [Текст] / П. В. Трусов [и др.] // Транспорт и подземное хранение газа. – 2007. – № 1. – С. 20–24.
14. Трусов, П. В. Исследование теплового состояния шумотеплозащитного кожуха газотурбинной установки газоперекачивающего агрегата [Текст] / П. В. Трусов, Д. А. Чарнцев, А. М. Печенкина // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2010. – № 8. – С. 8–10.
15. Мерзляков, Е. В. Моделирование газодинамических и тепловых процессов в объёме кожуха силового блока газоперекачивающих агрегатов [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е. В. Мерзляков. – Ижевск, 2013. – 20 с.
16. Lopez, E. 3D turbulent flow and heat transfer in a ventilated compressor cab [Text] / E. Lopez, S. V. Zhubri // CHAM. – 1997. – Vol. 2421/2. – P. 33. – Available at: [http://www.cham.co.uk/phoenics/d\\_polis/d\\_applic/recapps/compcab/compcab.doc](http://www.cham.co.uk/phoenics/d_polis/d_applic/recapps/compcab/compcab.doc)
17. Saunders, C. J. Outstanding safety questions concerning the analysis of ventilation and gas dispersion in gas turbine enclosures: Best Practice Guidelines on in-situ testing [Text] / C. J. Saunders // ECO/03/06 / Health & Safety Laboratory. – 2003. – 17 p. – Available at: [http://www.hse.gov.uk/research/hsl\\_pdf/2003/eco03-06.pdf](http://www.hse.gov.uk/research/hsl_pdf/2003/eco03-06.pdf)
18. Lewis, M. J. A study of the consequences of leaks from gas turbine power plant sited in a turbine hall [Text] / M. J. Lewis, C. J. Lea // HSL/2000/19 / Health & Safety Laboratory. – 2000. – 44 p. – Available at: [http://www.hse.gov.uk/research/hsl\\_pdf/2000/hsl00-19.pdf](http://www.hse.gov.uk/research/hsl_pdf/2000/hsl00-19.pdf)
19. Santon, R. C. Studies into the role of ventilation and the consequences of leaks in gas turbine power plant acoustic enclosures and turbine halls [Text] / R. C. Santon, C. J. Lea, M. J. Lewis, D. K. Pritchard, A. M. Thyer, Y. Sinai // Hazards XV : symposium series № 147. – Manchester, UK, 2000. – 15 p. – Available at: [https://books.google.com.ua/books?id=hJeaCRAs6KYC&printsec=frontcover&dq=hazards+XV&hl=ru&sa=X&ved=0CBwQ6AEwAGoVChMIjPy\\_f\\_rxwIVglssCh1RqgAt#v=onepage&q=hazards%20XV&f=false](https://books.google.com.ua/books?id=hJeaCRAs6KYC&printsec=frontcover&dq=hazards+XV&hl=ru&sa=X&ved=0CBwQ6AEwAGoVChMIjPy_f_rxwIVglssCh1RqgAt#v=onepage&q=hazards%20XV&f=false)
20. Phelps, P. Ventilation and Leak Dispersion in CCGT Enclosures [Text] / P. Phelps, D. Wylie. – 2000. – Available at : [http://www.cham.co.uk/PUC/PUC\\_Luxembourg/Presentations/Flowsolve\\_Phelps\\_Gas\\_Leaks.ppt](http://www.cham.co.uk/PUC/PUC_Luxembourg/Presentations/Flowsolve_Phelps_Gas_Leaks.ppt)