

МАШИНИ, ОБЛАДНАННЯ ТА МАТЕРІАЛИ

УДК 620.9

DOI: 10.31471/1993-9965-2018-2(45)-16-23

ПРОЕКТУВАННЯ РЕКУПЕРАТОРА НА ПУЛЬСАЦІЙНИХ ТЕПЛОВИХ ТРУБКАХ ДЛЯ ОБ'ЄКТІВ НАФТОГАЗОВОГО КОМПЛЕКСУ

І.Р. Ващишак, Є.Р. Доценко

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська 15; тел. (0342) 504708,
e-mail: savchyn.ira@gmail.com*

Актуальність роботи зумовлена доцільністю створення систем вентиляції будинків, приміщень та об'єктів нафтогазового комплексу з високонадійними енергоефективними рекуператорами. Проаналізовано системи вентиляції будинків і конструкції рекуператорів повітря та встановлено, що оптимальним варіантом для системи вентиляції є рекуператор на теплових трубках. Вказано на недоліки гнітових теплових трубок. Розглянуто будову та принцип дії пульсаційних теплових трубок. Наведено принцип дії рекуператора на пульсаційних теплових трубках. Підбрано теплоносій для капіляру рекуператора. Здійснено розрахунок характеристик теплообмінника на пульсаційних теплових трубках. Спроектовано систему вентиляції будинку з рекуператором на пульсаційних теплових трубках.

Ключові слова: енергетична ефективність, система вентиляції, рекуператор, тепла трубка, пульсаційна тепла трубка.

Актуальность работы обусловлена целесообразностью создания систем вентиляции домов, помещений и объектов нефтегазового комплекса с высоконадежными энергоэффективными рекуператорами. Проанализированы системы вентиляции зданий и конструкции рекуператоров воздуха и установлено, что оптимальным вариантом для системы вентиляции является рекуператор на тепловых трубках. Проанализированы недостатки фетильных тепловых трубок. Рассмотрены устройство и принцип действия пульсационных тепловых трубок. Описан принцип действия рекуператора на пульсационных тепловых трубках. Подобран теплоноситель для капилляра рекуператора. Произведен расчет характеристик теплообменника на пульсационных тепловых трубках. Спроектирована система вентиляции дома с рекуператором на пульсационных тепловых трубках.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, система вентиляции, рекуператор, тепловая трубка, пульсационная тепловая трубка.

The urgency of work is due to the expediency of ventilation systems development for structures and buildings with highly reliable energy-efficient recuperators. The ventilation systems of buildings and designs of air recuperators were analyzed and it was determined that the optimum variant for a ventilation system of a private house would be a recuperator on heat pipes. The disadvantages of wick heat pipes were presented. The structure and principle of pulsating heat pipes were considered. The recuperator operation principle of pulsating heat pipes was given. A coolant was selected for the recuperator capillary vessel. The heat exchanger characteristics were calculated for pulsating heat pipes. The house ventilation system with the recuperator on the pulsating heat pipes was designed.

Key words: energy efficiency, ventilation system, recuperator, heat pipe, pulsating heat pipe.

Вступ

Забезпечення комфортних умов перебування та праці людей у будинках та приміщеннях об'єктів нафтогазового комплексу залежить від температури у приміщеннях та якості повітря в них. Застосування різноманітних опалюва-

льних приладів та систем підтримання якості повітря (зволожувачів, осушувачів) дає позитивний результат в короткочасній перспективі, є доволі дорогим і, зазвичай, технічно складним. Набагато краще з цим справляються системи вентиляції. Однак, для підтримання якості повітря на належному рівні необхідно, щоб робота

системи вентиляції здійснювалась постійно. Пасивні системи вентиляції не забезпечують належного рівня повітрообміну через нерівномірний притік і відтік повітря з приміщень протягом доби. Найкраще з цим справляються активні припливно-витяжні системи вентиляції. Для економії енергоресурсів у них застосовуються спеціальні пристрої – рекуператори. Більшість цих пристроїв є громіздкими і доволі складними, а підвищення їх енергоефективності вимагає значних капіталовкладень і проведення великих обсягів робіт.

Отже, питання підвищення енергоефективності систем вентиляції з рекуператорами та зменшення споживання енергоносіїв при їх роботі є доволі актуальним. Від того, як сконструйовано та з яких елементів складається рекуператор системи вентиляції будинку чи приміщення, безпосередньо залежать температура і вологість повітря у приміщеннях та витрати на оплату енергоносіїв.

Шляхами підвищення рівня енергоефективності систем вентиляції є застосування сучасних технологій та конструкторських підходів при створенні рекуператорів для них.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

За даними різних досліджень, яким би активним не був ритм людського життя, як мінімум половину дня люди проводять на роботі. Від мікроклімату будинків та приміщення об'єктів нафтогазового комплексу залежить і самопочуття людини. Санітарне законодавство визначає головні параметри внутрішнього середовища [1]:

- параметри мікроклімату, тобто ті, що впливають на теплообмін людини з середовищем: температура повітря, відносна вологість повітря, швидкість руху повітря, середня температура поверхонь приміщення (радіаційна температура) та інтенсивність теплового опромінювання;

- мінімальна кількість зовнішнього повітря, що подається до приміщення;

- концентрація вуглекислого газу в повітрі;

- запиленість повітря;

- наявність спор грибків та плісняви, що активно розвиваються при підвищеній відносній вологості;

- електромагнітні випромінювання та радіаційний фон.

Вентиляція виконує два основних завдання: забезпечення комфортних умов у будинку та утримання його конструкцій у належному стані. При сучасному центральному опаленні, якісній теплоізоляції та герметичних віконних конструкціях вентиляція має величезне значення.

При неправильній спроектованій, або погано діючій вентиляції всі енергоефективні рішення можуть бути зведені нанівець. Так, наприклад, при інтенсивному повітрообміні у приміщенні буде завжди холодно, а при недостатньому – волого і некомфортно. Також можуть з'являтися місця концентрації вологи, що

з часом призводить до появи плісняви. Також значна частина потужності системи опалення (до 40-50%) витрачається для нагрівання припливного повітря з вулиці, що створює додаткову витрату енергоресурсів. Запобігти цьому покликані пристрої, які називаються рекуператорами.

Застосування рекуператорів дозволяє при незначно більшій вартості системи вентиляції суттєво зменшити витрати енергоносіїв (природного газу, деревного палива, мазуту, вугілля чи електроенергії) для підтримання комфортних умов у приміщеннях, де працюють люди. А застосування сучасних технологій дозволяє створити енергоефективні малогабаритні високонадійні рекупераційні пристрої, які можуть працювати в широкому діапазоні температур протягом тривалого часу.

Найоптимальнішим є застосування пасивних рекуператорів з мінімально можливим технічним обслуговуванням та максимально можливим коефіцієнтом корисної дії (відношенням потужності, прийнятої від нагрітого теплового потоку витяжного повітря до потужності, що віддається припливному повітряному потоку).

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми, якій присвячується стаття

Вимоги до вентиляції приміщень регламентуються ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування. Для всіх видів приміщень, в тому числі і приміщень об'єктів нафтогазового комплексу, існують загальні положення та принципи проектування систем вентиляції. Вентиляція квартири, будинку чи приміщення об'єктів нафтогазового комплексу, має один і той же принцип розподілу повітряних потоків у приміщеннях. Він полягає в тому, що подача повітря проводиться в робочу зону, тобто зону роботи і відпочинку людей, а витяжка – із зон з підвищеним виділенням вологи, диму, запахів і пилу.

Найефективнішою для забезпечення стабільного повітрообміну та підтримання комфортних умов у приміщенні є механічна припливно-витяжна вентиляція [2, 3]. Якщо ж її доповнити рекуператором, то це дозволить суттєво зменшити витрату енергоносіїв на опалення приміщення.

Примусова припливно-витяжна система вентиляції повинна мати функції фільтрації повітря, що надходить з вулиці. Особливо ця функція необхідна за умови розміщення будинку чи приміщення у густонаселеному місті, або в запиленій промисловій зоні, чи біля швидкісної траси тощо.

Припливно-витяжна вентиляція з теплообмінником-рекуператором забезпечує постійний обмін повітря у приміщеннях та запобігає надмірній вологості, появи цвילі, запахів. Такі установки гарантують чистоту та постійну свіжість повітря. Постійний обмін повітря помітно знижує концентрацію бактерій, пилу та інших

шкідливих речовин в оточуючому середовищі та підвищує комфорт і якість життя.

На даний час відомо 5 основних видів рекуператорів повітря [4]: пластинчастий, роторний, з проміжним теплоносієм, камерний, на теплових трубках.

Пластинчастий рекуператор характеризується наявністю нерухомих пластикових або металевих пластин у теплообміннику. Потoki припливного і витяжного повітря рухаються назустріч один одному. Повітряні потоки не змішуються, так як вони розділені перегородками з пластин. Тепле повітря, що видаляється через пластинчасті перегородки рекуператора, через них нагріває холодне припливне повітря. ККД пластинчастих рекуператорів становить 40-65 %. [5]. Недоліками таких рекуператорів є утворення конденсату, що нерідко призводить до обмерзання теплообмінника та підвищує чутливість до вібрацій і забруднення.

У роторному рекуператорі передача тепла здійснюється за допомогою ротора, який постійно обертається, перебуваючи між припливним і витяжним повітряними каналами. Внаслідок цього повітряні потоки можуть змішуватись і обмінюватись вологою, через що в приміщенні може зберігатись необхідний рівень вологості без застосування додаткових засобів. Суттєвою перевагою роторних рекуператорів є також їх високий ККД (70-90 %). Однак, роторні рекуператори повинні мати додаткове живлення для роботи електродвигуна ротора та системи його управління. Через незначне змішування припливного та витяжного повітряних потоків можливе поширення запахів у приміщенні. Велика кількість складної механіки, яка забезпечує роботу роторного рекуператора, ускладнює процес обслуговування, знижує надійність та має значні розміри.

У рекуператорах з проміжним теплоносієм за передачу тепла відповідає вода або водно-гліколевий розчин. У конструкції такого рекуператора наявні два теплообмінника. Один з них розміщений у припливному каналі системи вентиляції, а інший – у витяжному. Водно-гліколевий розчин за допомогою насоса постійно циркулює між теплообмінниками. Температура теплоносія зростає завдяки розігрітому потоку повітря, яке видаляється з приміщення, а потім тепла енергія передається свіжому повітрю, що надходить з вулиці. Замкнута система виключає змішування зустрічних повітряних мас [6]. Встановлюють такі рекуператори у випадках, коли системи вентиляції розділено, тобто – припливні та вихідні повітряні маси циркулюють за допомогою різних систем.

Переваги рекуператорів з проміжним теплоносієм: повна відсутність змішування повітряних потоків, можливість роботи при від'ємних температурах, можливість зміни ефективності рекуператора шляхом регулювання швидкості обертів насоса подачі теплоносія. До недоліків слід віднести складність і значні габаритні розміри рекуператора та його низький ККД (45-55 %).

За конструкцією рекупераційний вузол камерного типу – це закрита камера, розділена засувкою на дві частини. Єдина рухома частина рекуператора – засувка, що забезпечує рух вхідного повітряного потоку тільки через попередньо нагріту вихідним повітряним потоком частину камери. Коли нагрітий потік повітря проходить через будь-яку з двох частин теплообмінника, стінки камери, отримавши теплову енергію, нагріваються. Після цього, переміщенням засувки змінюється подача повітря, і через цю частину камери починає проходити вже припливний повітряний потік, що забирається з навколишнього середовища. Контактуючи зі стінками нагрітої камери, повітряна маса, що надходить до приміщення, отримує теплову енергію. Отже, у приміщення свіже повітря попадає вже підігрітим [7].

Перевагами камерних рекуператорів є: високий ККД (80-90 %), висока надійність і значні терміни експлуатації через мінімальну кількість рухомих частин, простота конструкції і можливість встановлення та обслуговування самим споживачем. До недоліків можна віднести передавання внаслідок незначного змішування потоків запахів, та необхідність постійного технічного обслуговування теплообмінного вузла рекуператора через наявність рухомих деталей (засувки та її приводу).

Принцип функціонування теплообмінника на теплових трубках базується на фізичному процесі зміни стану речовини внаслідок її нагрівання. Як теплоносії у теплових трубках рекуператорів використовують легкокип'ячий газ (наприклад, фреон). У рекуператорі теплові трубки розміщуються вертикально: нижній кінець теплообмінника розміщений у витяжному каналі, а верхній в припливному повітроводі. Вихідні потоки огинають кінець трубки, внаслідок чого фреон всередині трубки нагрівається, закипає і випаровується. Газ піднімається вгору і через стінку трубки віддає теплову енергію припливному потоку повітря. Після цього фреон конденсується і стікає в нижню частину рекуператора. Термічний цикл з високою швидкістю повторюється по замкнутому колу [6, 8, 9].

До переваг рекуператорів на теплових трубках можна віднести:

- незмішувальність потоків;
- безшумність роботи (через відсутність рухомих частин);
- порівняно високий ККД – до 65%;
- простоту конструкції і невибагливість в обслуговуванні;
- компактні габарити і невелику вагу;
- енергонезалежність (теплоносії циркулює природним шляхом).

Однак, рекуператори на теплових трубках мають і недоліки:

- через значні розміри теплових трубок їх кількість у рекуператорі обмежена;
- для збільшення площі контактування зовнішньої поверхні трубки з повітряними масами її потрібно покривати спеціальними голками, що збільшує масу трубки і зменшує інтенсивність теплообміну та ККД;

– високий рівень ККД досягається тільки у вузькому температурному діапазоні роботи трубки;

– при різкому перегріванні весь фреон випаровується, а при недостатньому нагріванні інтенсивність пароутворення сповільнюється, що впливає на теплопередачу повітряних потоків;

– невисока міцність трубок – зміна форми або розгерметизація – знижує працездатність обладнання.

Отже, оптимальним варіантом для системи вентиляції приватного будинку, з огляду на її вартість, простоту обслуговування та надійність, є рекуператор на теплових трубках. Однак, внаслідок того, що відношення маси теплової трубки до її площі є досить значним, на нагрівання поверхні трубки витрачається багато енергії теплового повітряного потоку, що знижує ККД рекуператора.

Мета проведення досліджень

Мета роботи полягає у вирішенні науково-практичної задачі в галузі енергетичного менеджменту – модернізації системи вентиляції будинків та приміщень об'єктів нафтогазового комплексу шляхом застосування рекуператора на пульсаційних теплових трубках малого діаметру для економії енергоресурсів та забезпечення комфортних умов перебування.

Висвітлення основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням одержаних наукових результатів

Основною перевагою пульсаційних теплових трубок (ПТТ) (порівняно зі звичайними гнітовими) є простота конструкції, низька вартість, дешевизна, можливість надати трубі практично будь-якої форми, невеликі розміри та маса. Висока теплопровідність ПТТ досягається не простим випаровуванням рідини, а рухом парових та рідинних «снарядів», що є ефективнішим способом перенесення теплоти.

ПТТ не містять ні капілярно-пористої структури, ні клапанів, ні інших елементів для переміщення теплоносія із зони нагрівання в зону конденсації. ПТТ нормально працюють при будь-якій орієнтації у просторі.

ПТТ – це тонкостінна металева герметизована трубка малого діаметру, частково заповнена робочою рідиною, з якої повністю видалене повітря. Основною відмінністю ПТТ від класичної теплової трубки є наявність вигинів (витків), внаслідок чого ПТТ може мати значну довжину. В загальному випадку ПТТ – це металевий капіляр, вигнутий у вигляді змійовика (рис. 1). Після герметизації під дією капілярних сил в ПТТ формуються парові та рідинні снаряди, які доволно розподіляються по всій її довжині.

Працює ПТТ наступним чином. Після підведення теплового потоку до зони нагрівання (ЗН), в ній починається процес пароутворення, завдяки якому в ПТТ змінюється розподіл паровмісту,



Рисунок 1 – Загальна структура пульсаційної теплової трубки

вмісту, що призводить до виникнення градієнту тиску, під дією якого починається пульсуючий рух теплоносія із зони нагрівання через зону транспортування (ЗТ) в зону конденсації (ЗК), що супроводжується перенесенням теплової енергії. Переміщення частини теплоносія із зони нагрівання в зону конденсації знову змінює розподіл паровмісту в ПТТ, що, в свою чергу, призводить до зміни градієнту тиску, під дією якого теплоносій повертається в зону нагрівання. Таким чином, завдяки взаємопов'язаним коливанням паровмісту та тиску в ПТТ підтримуються автоколивання (пульсації) двофазного потоку теплоносія [10, 11]. Теплопередача в ПТТ під дією теплового потоку відбувається за рахунок випаровування та конденсації теплоносія, а також за рахунок теплообміну із рідинними та паровими снарядами, що циркулюють між зонами випаровування та конденсації [12, 13].

Завдяки тому, що процеси утворення парових бульбашок, їх відриву і переміщення відбуваються за короткі проміжки часу, то правильно працююча ПТТ може передавати значну кількість теплоти.

Отже, на відміну від рекуператорів на звичайних теплових трубках, рекуператор на ПТТ має простішу конструкцію, а за рахунок меншого діаметра капілярів ПТТ можна помістити більшу їх кількість, що збільшує площу контактування ПТТ з потоками повітря, зменшує розміри і підвищує теплову ефективність рекуператора.

У залежності від способу передачі теплоти ПТТ мають чотири режими роботи: теплопередача теплопровідністю і конвекцією, термосифонний режим, пульсаційний режим, передкризовий режим [14]. Основним режимом роботи ПТТ є пульсаційний, де вона має найвищий ККД. Найкраще пульсаційний режим забезпечується у ПТТ замкнутого типу. Кінці замкнутої ПТТ з'єднуються між собою, що дозволяє двофазовому потоку теплоносія циркулювати замкнутим контуром капіляра.

Отже, теплообмінником в удосконаленому рекуператорі виступає багатовиткова ПТТ замкнутого типу, розміщена вертикально. Принцип дії рекуператора з теплообмінником на такій ПТТ зображено на рис. 2. Працює він наступним чином. Тепле повітря, що видаляється з приміщення, омиває витки багатовиткової

ПТТ у ЗН, віддаючи їм частину теплової енергії. Це спричиняє появу, зростання і рух парових «снарядів» у внутрішньому об'ємі ПТТ. Парові «снаряди» переносять тепловий потік із ЗН в ЗК через ЗТ.

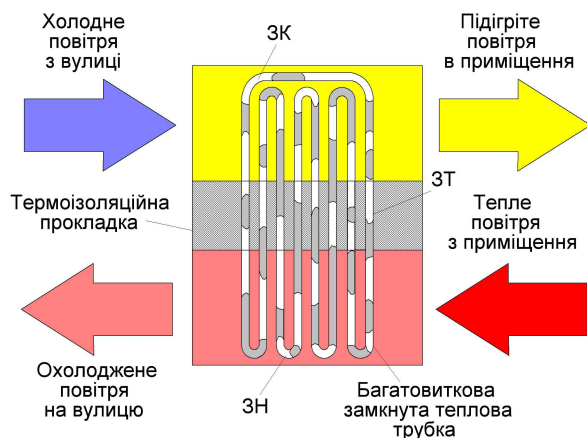


Рисунок 2 – Принцип дії рекуператора з теплообмінником на ПТТ замкнутого типу

ЗТ теплообмінника розміщена в термоізоляційній прокладці, яка поділяє рекуператор на дві камери (нагрівальну та конденсаційну).

Потік холодного повітря з вулиці омиває витки ПТТ в ЗК і підігрівается від контактування з ними. Це повітря подається у приміщення, де знаходяться люди.

Оскільки рекуператор повинен передавати теплові потоки при незначній температурі витяжного повітря (до +25°C), то для його теплообмінника потрібно підібрати такий теплоносіє, який би забезпечував впевнений пульсаційний режим роботи теплових трубок. На нашу думку, таким теплоносієм є бензин А-96. Його температура кипіння при зниженому тиску сягає +18°C, що є оптимальним для забезпечення пульсаційного режиму роботи ПТТ у діапазоні температур +18...+25°C. Густина бензину $\rho_{бенз.} = 770 \text{ кг/м}^3$, коефіцієнт поверхневого натягу $\sigma_{бенз.} = 2900 \text{ Н/м}$, теплота пароутворення $r_{бенз.} = 300000 \text{ Дж/кг}$, коефіцієнт динамічної в'язкості $\mu_{бенз.} = 0,53 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ [15].

Ефективність теплоносія визначається за параметром N [8]:

$$N = \frac{\rho_{бенз.} \cdot \sigma_{бенз.} \cdot r_{бенз.}}{\mu_{бенз.}} = \frac{770 \cdot 2900 \cdot 300000}{0,53 \cdot 10^{-3}} \approx 1,3 \cdot 10^{15}$$

Бензин марки А-96 має майже таку ж ефективність як розповсюджений теплоносіє для ПТТ етанол, тому він цілком підійде для ПТТ рекуператора.

Як матеріал капіляру ПТТ за критеріями надійності та вартості вибираємо мідь.

Розрахунок параметрів ПТТ рекуператора проведемо за методикою, наведеною в [14]. Розрахуємо внутрішній діаметр капіляру ПТТ для бензину марки А-96 з виразу:

$$d_{крит} \leq 2 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{бенз.}}{g \cdot (\rho_p - \rho_n)}}, \quad (1)$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу теплоносія, Н/м;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

ρ_p, ρ_n – густина рідкої та парової фази теплоносія відповідно, кг/м³.

Тоді:

$$d_{крит} \leq 2 \cdot \sqrt{\frac{2900}{9,8 \cdot (770 - 3,5)}} = 1,24 \approx 1 \text{ (мм)}.$$

Отже, внутрішній докритичний діаметр капіляру ПТТ повинен становити 1 мм.

Як ПТТ вибираємо мідну капілярну трубку з внутрішнім діаметром $d = 1 \text{ мм}$, товщиною стінки $h_{СТ} = 0,6 \text{ мм}$ і коефіцієнтом ефективної теплопровідності $\lambda = 390 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$.

Для розрахунків ефективності рекуператора на ПТТ задаємося площею приміщень будинку, яка становила 112,7 м². Температури припливного зовнішнього повітря у опалювальний сезон: $t_{ноч} = -20 \text{ °C}$ (початкова температура – температура повітря ззовні будинку); $t_{кін} = +25 \text{ °C}$ (кінцева температура – температура повітря всередині приміщень будинку).

Згідно з вимогами максимально необхідний об'єм чистого повітря – 3 м³/год на 1 м² площі приміщення вдень та 0,6 м³/год на 1 м² вночі. Тому при площі приміщень будинку 112,7 м² необхідно, щоб вентиляція забезпечувала повітрообмін:

$$L = S_{вуд} \cdot 3 = 112,7 \cdot 3 = 338,1 \approx 340 \text{ (м}^3\text{/год)}.$$

Відповідно, витрати на нагрівання зовнішнього повітря знаходяться з виразу:

$$Q_{max} = 0,335 \cdot L \cdot (t_{ноч} - t_{кін}) = 0,335 \cdot 340 \cdot (+25 - (-20)) = 5125,5 \text{ (Вт)}.$$

Визначення площі поверхні теплообміну ПТТ в ЗН є складним завданням, яке вирішується експериментально. Але, оскільки в роботах [14, 16] для мідних ПТТ діапазони густин підведених теплових потоків змінюються від $1 \cdot 10^3$ до $1 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$, то виберемо площу поверхні теплообміну ПТТ в ЗН $S_{ЗН} = 0,7 \text{ м}^2$.

Спроекуємо ПТТ для теплообмінника. Спочатку розглянемо частину витка ПТТ, розміщену у ЗН. Вибираємо висоту ЗН 1 на рівні 150 мм. Віддаль між центрами осей витка ПТТ повинна бути не меншою 15 мм. Однак, чим вона більша, тим менший опір створюється рухові парових «снарядів». Виходячи з цього, вибираємо віддаль між центрами осей витка на рівні 30 мм. Оскільки зближення осей витка в ЗТ ПТТ запобігає втратам теплоти при транспортуванні теплоносія, то використаємо це і встановимо відстань h на рівні 20 мм. Отже, зовнішній вигляд витка ПТТ в ЗН для проєктованого рекуператора відповідатиме зображеному на рисунку 3. ПТТ теплообмінника 1 закріплюється на термоізолюючій прокладці 2, яка має виступи для приєднання до термоізолюючих прокладок інших блоків з аналогічними ПТТ.

Площу поверхні теплообміну витка ПТТ в ЗН, згідно з рисунком 3 визначимо з виразу:

$$S_{\text{витка ЗН}} = \left(\frac{1}{2} \cdot \pi \cdot D + 2 \cdot l \right) \cdot d =$$

$$= \left(\frac{1}{2} \cdot 3,14 \cdot 0,03 + 2 \cdot 0,15 \right) \cdot 0,0022 = 7,64 \cdot 10^{-4} \text{ (м}^2\text{)}$$

Згідно з [16] для теплового потоку 5125 Вт вибираємо кількість витків однієї замкнутої ПТТ на рівні 8. Тоді, для восьмивиткової ПТТ площа поверхні витків у ЗН становитиме:

$$S_{8\text{в ЗН}} = S_{\text{витка ЗН}} \cdot 8 = 7,64 \cdot 10^{-4} \cdot 8 \approx 6,1 \cdot 10^{-3} \text{ (м}^2\text{)}$$

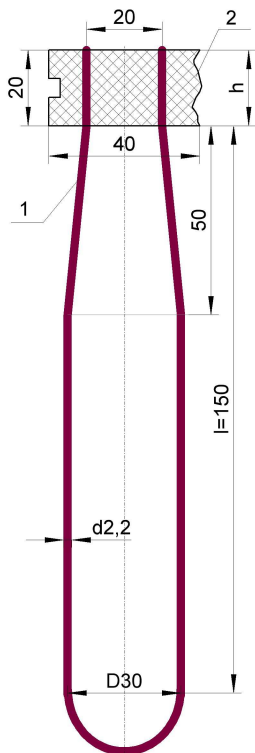


Рисунок 3 – Загальний вигляд частини витка ПТТ в ЗН

Оскільки припливно-втяжна вентиляція передбачає, що об'єми повітря, яке видаляється з приміщення і яке подається в нього, є однаковими, то для забезпечення оптимального режиму передачі теплоти з ЗН в ЗК доцільно, щоб розміри і конфігурація ПТТ у цих зонах були однаковими.

Тому, блок з однією восьмивитковою замкнутою ПТТ для теплообмінника рекуператора матиме наступний вигляд (рисунок 4).

Необхідна кількість блоків замкнутих ПТТ для теплообмінника проектованого рекуператора становить:

$$n_{\text{ПТТ}} = \frac{S_{\text{ЗН}}}{S_{8\text{в ЗН}}} = \frac{0,7}{6,1 \cdot 10^{-3}} = 114,75 \text{ (шт.)}$$

Заокруглюючи до меншого числа, отримаємо, що кількість блоків становить 114 шт.

Враховуючи параметри витка ПТТ з рисунка 3 і спосіб розміщення витків у блоці з рисунка 4, розміри термоізолюючої прокладки одного блока з ПТТ становлять: довжина – 80 мм, ширина – 56 мм.

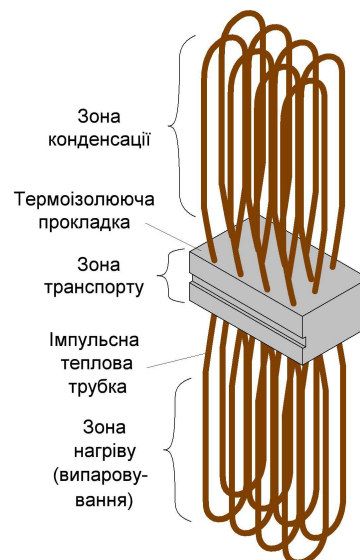


Рисунок 4 – Загальний вигляд однієї ПТТ теплообмінника рекуператора

Через те, що довжини витків ПТТ в ЗН та ЗК ($L_{\text{ЗН}}$, $L_{\text{ЗК}}$) становлять по 165 мм, то висоту цих зон в рекуператорі можна вибрати на рівні 170 мм. В ширину ж доцільно розмістити по 6 блоків з ПТТ. Тоді вона буде становити $6 \cdot 56 = 336 \approx 340$ мм, тобто, рекуператор матиме квадратний поперечний переріз. З цього виходить, що по довжині рекуператора повинно розміщуватись $114 / 6 = 19$ блоків. Тоді загальна довжина рекуператора становитиме: $19 \cdot 80 = 1520$ мм.

Загальний вигляд частини спроектованого рекуператора з теплообмінником на ПТТ зображено на рисунку 5.

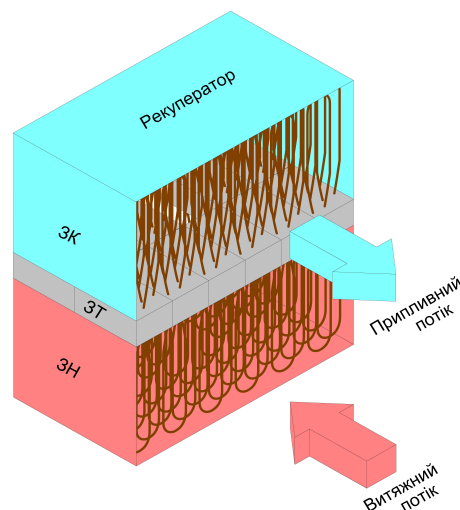


Рисунок 5 – Зовнішній вигляд частини рекуператора з теплообмінником на ПТТ

Для оцінки ефективності рекуператора визначимо його параметри. Спочатку розрахуємо загальну довжину всіх трубок змійовика ПТТ:

$$L_3 = (4 \cdot l + \pi \cdot D + h \cdot 2) \cdot 8 \cdot n_{\text{ПТТ}} =$$

$$= (4 \cdot 0,15 + 3,14 \cdot 0,03 + 0,02 \cdot 2) \cdot 8 \cdot 114 =$$

$$= 669,5 \approx 670 \text{ (м)}$$

Загальний внутрішній об'єм всіх трубок змійовика ПТТ знаходиться з виразу:

$$V_3 = \frac{\pi \cdot d_{\text{ВН}}^2 \cdot L_3}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,001^2 \cdot 670}{4} \approx 5,3 \cdot 10^{-4} \text{ (м}^3\text{)},$$

де $d_{\text{ВН}}$ – внутрішній діаметр капіляру ПТТ, м.

Вибираємо коефіцієнт заповнення трубки, оптимальне значення якого для замкнених ПТТ становить 50% від V_3 . Тоді об'єм теплоносія у теплообміннику рекуператора становитиме: $5,3 \cdot 10^{-4} / 2 \approx 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$.

Далі потрібно визначити перепади температур по ЗН, ЗТ та ЗК. Оскільки довжини ЗН і ЗК однакові, а ЗТ має малу довжину, то перепад температур по всій довжині витка ПТТ можна вважати лінійним. Самі ж перепади температур у зонах ПТТ можна оцінити з експериментальних даних, наведених у роботах [11, 12, 14, 16, 17]. Якщо прийняти замість параметрів теплоносіїв, вказаних у цих роботах, параметри вибраного бензину марки А-96, а замість вказаних температур теплових потоків в ЗН – задану температуру, то отримаємо перепад температури між ЗН і ЗК $t_{\text{ЗН-ЗК}} = 6,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Звідси можна оцінити ефективність теплообмінника за температурою:

$$\eta_i = 100 - \frac{6,5 \cdot 100}{25} = 74 \text{ \%}.$$

Тоді тепловий потік в ЗК ПТТ становитиме:

$$Q_{\text{ЗК}} = Q_{\text{max}} \cdot \eta_i / 100 = 5125,5 \cdot 74 / 100 \approx 3793 \text{ (Вт)}.$$

Для спрощення, вважаючи, що густини теплових потоків припливного та витяжного повітря у всьому перерізі ЗН та ЗК є однаковими, розрахуємо перепади температур по товщині стінок ПТТ $\Delta t_{\text{ЗН}}^{\text{cm}}$ та $\Delta t_{\text{ЗК}}^{\text{cm}}$:

$$\Delta t_{\text{ЗН}}^{\text{cm}} = \frac{Q_{\text{max}} \cdot h_{\text{СТ}}}{\lambda} = \frac{5125,5 \cdot 0,0006}{390} \approx 0,01 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\Delta t_{\text{ЗК}}^{\text{cm}} = \frac{Q_{\text{ЗК}} \cdot h_{\text{СТ}}}{\lambda} = \frac{3793 \cdot 0,0006}{390} \approx 0,01 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Визначимо загальний перепад температур між ЗН та ЗК ПТТ з виразу:

$$\Delta t = \Delta t_{\text{ЗН-ЗК}} + \Delta t_{\text{ЗН}}^{\text{cm}} + \Delta t_{\text{ЗК}}^{\text{cm}} = 6,5 + 0,01 + 0,01 \approx 6,5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Розраховуємо термічний опір ПТТ:

$$R = \frac{\Delta t}{Q_{\text{max}}} = \frac{6,5}{5125,5} \approx 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ (}^\circ\text{C/Вт)}.$$

Визначимо еквівалентну теплопровідність однієї замкнутої ПТТ:

$$\lambda_{\text{екв}} = \frac{Q_{\text{max}} \cdot L_{\text{еф}}}{\Delta t \cdot S_K} = \frac{Q_{\text{max}} \cdot \left(2 \cdot l + \frac{1}{2} \pi \cdot D\right)}{\Delta t \cdot \pi \cdot d},$$

де $L_{\text{еф}}$ – ефективна довжина ПТТ, яка дорівнює півсумі дожин ЗН та ЗК, м;

S_K – площа поперечного перерізу капіляру ПТТ, м²;

$$\lambda_{\text{екв}} = \frac{5125,5 \cdot (2 \cdot 0,15 + 0,5 \cdot 3,14 \cdot 0,03)}{6,5 \cdot 3,14 \cdot 0,0022} = 3,96 \cdot 10^4 \text{ (Вт/(м} \cdot \text{ }^\circ\text{C))}.$$

На основі спроектованого теплообмінника було розроблено схему припливно-витяжної вентиляції будинку, зображену на рисунку 6.

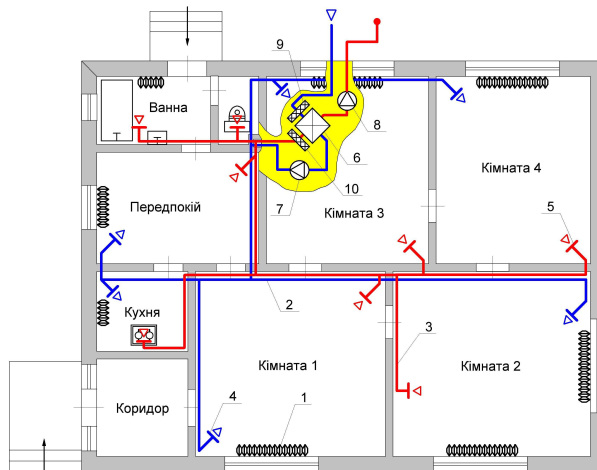


Рисунок 6 – Схема системи вентиляції приватного будинку з рекуператором на ПТТ

Робота припливно-витяжної вентиляції полягає в наступному. Повітря з вулиці за допомогою вентилятора припливної лінії 7 засмоктується у припливний повітропровід 2 через повітряний фільтр 10 і рекуператор на ПТТ. З припливного повітропроводу 2 чисте повітря поступає у найбільш нагріті місця 4 квартири (в зону розміщення радіаторів опалення 1). Відпрацьоване повітря з різних приміщень будинку через місця забору повітря 5 затягується у витяжний повітропровід 3 за допомогою вентилятора витяжної лінії 8 та виходить на вулицю через повітряний фільтр 9 і рекуператор 6. У рекуператорі 6 за допомогою теплообмінника на ПТТ здійснюється теплообмін між припливним та витяжним потоками повітря.

Як видно з отриманих результатів, термічний опір ПТТ теплообмінника трубки є доволі низьким, що дозволить передавати тепловий потік з ЗН в ЗК з високою швидкістю і мінімальними втратами. Еквівалентна теплопровідність спроектованої ПТТ для рекуператора на порядки більша за теплопровідність міді, що свідчить про високу теплову ефективність спроектованого теплообмінника.

Рекуператор на ПТТ є пасивним пристроєм, що не вимагає додаткового живлення і немає рухомих частин. Завдяки своїй конструкції він простий в експлуатації і обслуговуванні.

ВИСНОВКИ

Використання системи вентиляції з удосконаленим рекуператором на пульсаційних теплових трубках підвищить енергоефективність будинку чи приміщення, що дозволить економити енергетичні ресурси та покращити

умови проживання в будинку чи праці на об'єктах нафтогазового комплексу.

В подальшому доцільно експериментально дослідити спроектований рекуператор на пульсаційних теплових трубах для підтвердження його енергоефективності.

Література

1 Мілейковський В.О. Вентиляція індивідуального житлового будинку / В.О. Мілейковський, Л.М. Котелков. – Дніпро: Середняк Т. К., 2018. – 156 с.

2 Вентиляція у квартирі: витяжна, припливна та припливно-витяжна [електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://alterair.ua/uk/solutions/ventilyatsiya-v-kvartire/>.

3 Природна приточно-витяжна вентиляція в квартирі [електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://teplo.ntk.com.ua/ventyljacija/ventyljacija-kvartury-robymo-vse-svoimyrukamy.php>.

4 Системи вентиляції з рекуперацією тепла [електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://montagnik.com/remont/2771-systemy-ventilazii-z-rekuperaziey-tepla.html>.

5 Рекуператор повітря для квартири: робимо своїми руками [електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://poradu24.com/remontu/oralennya/rekuperator-povitrya-dlya-kvartiri-robimo-svo%D1%97mi-rukami.html>.

6 Рекуперація тепла в системах вентиляції: принцип роботи і варіанти виконання [електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.dizayn.top/2017/09/rekuperatsiya-tepla-v-systemah-ventilyatsiyi.html>.

7 Камерні рекуператори [електронний ресурс]. – Режим доступу: http://9999812.ru/poleznoe/kamernye_rekuperatory/.

8 Технологические основы тепловых труб / Ивановский М.Н., Сорокин В.П., Чулков Б.А. [и др.]. – М.: Атомиздат, 1980. – 160 с.

9 Теплообмінники з теплових труб (ТТ) [електронний ресурс]. – Режим доступу: http://4exam.info/book_122_glava_36_7.5.1.

10. Miyazaki Y. Oscillating Heat Pipes / Miyazaki Y., Polasek F., Akachi H. // 30th International Conference on Environmental Systems (ICES), Toulouse, France. – 2000. – SAE Paper No. 2000-01-2375.

11 Reay D.A. Heat Pipes: Theory, Design, and Applications / D.A. Reay, P.A. Kew. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. – 377 p.

12 Nagvase S.Y. Parameters Affecting the Functioning of Close Loop Pulsating Heat Pipe: A Review / Nagvase S.Y., Pachghare P.R. // Research Journal of Engineering Sciences. – 2013. – Vol. 2. – P. 35-39.

13 Pramod R. Pachghare Effect of Working Fluid on Thermal Performance of Closed Loop Pulsating Heat Pipe: A Review / Pramod R. Pachghare, Ashish M. Mahalle, Shekhar Khedkar // Proc. of National Conference on Innovative Paradigms in Engineering & Technology. – 2012. – P. 27-31.

14 Алексеик Е.С. Вплив режимних та геометричних факторів на теплопередаючі характеристики пульсаційних теплових труб: дис. на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук: 05.14.06 / Алексеик Євгеній Сергійович; М-во освіти і науки України, НТУУ «КПІ» – Київ, 2015. – 167 с.

15 Табличні значення найбільш поширених рідин [електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ua-referat.com>.

16 Алексеик Е.С. Влияние количества витков на теплопередающие характеристики отдельных взятого витка многовитковых пульсационных тепловых труб / Алексеик Е.С., Кравец В.Ю. // Тезисы докладов и сообщений. XIV Минский международный форум по тепло- и массообмену – Минск, 2012 г. – Том 1, часть 1 – С. 379-381.

17 Mohod T.R. Design Parameters of Pulsating/Oscillating Heat Pipe: A Review / T.R. Mohod, R.T. Saudagar, P.R. Ingole and oth. // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). – 2013. – Vol. 2, Issue 4. – P. 461-463.

Стаття надійшла до редакційної колегії
12.12.18

Рекомендована до друку
професором Карнашем О.М.
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
канд. техн. наук Карнашем А.М.
(НВФ «Зонд», м. Івано-Франківськ)