

В. О. ТУЗ, Я. Є. ТРОКОЗ, Н. Л. ЛЕБЕДЬ

ТЕПЛОМАСООБМІН В ФІЛЬТР-СЕПАРАТОРІ ПАЛИВНОЇ СИСТЕМИ ГТУ ГПА

АННОТАЦІЯ На підставі експериментальних досліджень процесів при випаровуванні рідини в масообмінному елементі отримано емпіричні залежності для розрахунку локальної та середньої масовіддачі на початковій ділянці і ділянці стабілізованого процесу, розроблено фільтр-сепаратор паливного газу, який призначений для одержання гомогенного палива. Випробування дослідного зразка показало, що використання фільтр-сепаратора в системі паливоприготування ГТУ виключає попадання в камеру згорання важких вуглеводневих з'єднань, механічних домішок і сірки.

Ключові слова: газотурбінна установка (ГТУ), газоперекачуючий агрегат (ГПА), фільтр-сепаратор, тепломасообмін.

V. O. TUZ, Ya. Ye. TROKOZ, N. L. LEBED

HEAT-MASS EXCHANGE IN THE SEPARATING FILTER OF FUEL SYSTEM FOR THE GAS TURBINE PLANT OF GAS-COMPRESSOR UNIT

ABSTRACT The removal of mechanical impurities and drop moisture from the cycle air contributes to an increased reliable operation of the gas turbine plant of gas-compressor unit. Many scientific papers discuss the issues related to the air purification and little attention is paid to the preparation of fuel gas for the combustion. The presence of gas condensate and water drops in the fuel gas results in an increased irregularity of temperature field in the combustion chamber, the deposit formation in the burners, the erosion wear of blade row and the acceleration of erosion processes. A reliable operation of the gas turbine plant of gas-compressor unit requires preventing liquid hydrocarbons and water drops from entering the combustion chamber. A separating filter was developed for gas-compressor units installed in underground gas storages, whose operating conditions differ by an increased content of mechanical particles. The development of this filter is based on the experimental investigations of processes that occur in the heat-exchange element. This unit combines the principles of mechanical purification and heat exchange that allows us to produce fuel gas of appropriate quality. Pilot full-scale tests showed that the use of separating filter for the fuel preparation system of gas turbine plant prevents not only heavy hydrocarbon compounds and mechanical impurities, but also sulfur from getting into the combustion chamber. Thanks to this we manage to get rid of the sulfur corrosion of the equipment, which is caused by liquid hydrocarbon drops that get into the combustion chamber of gas turbine plant.

Key words: gas turbine plant, gas-compressor unit, separating filter and the heat-mass exchange.

Перелік умовних позначень

$Nu_D = \beta \ell / D$ – дифузійне число Нуссельта;

$Re = V_r \ell / \nu_r$ – число Рейнольдса для газу;

$Pr_D = \mu / (\rho D)$ – дифузійне число Прандтля;

$K = r / (\Delta t C_p)$ – число Кутателадзе, критерій фазового переходу.

Вступ

Підвищенню надійності роботи газотурбінної установки газоперекачуючого агрегату (ГТУ ГПА) сприяє очищення циклового повітря і паливного газу від механічних домішок і краплинної вологи. Проблемам очищення повітря присвячені роботи [1, 2], тоді як підготовці паливного газу до спалювання приділяється мало уваги [3].

Наявність в паливному газі газового конденсату і води у вигляді крапель приводить до підвищення нерівномірності температурного поля в камері згорання, утворення нагару на пальникових пристроях, ерозійного зносу лопаткового апарату і прискоренню корозійних процесів.

Виходячи з вищесказаного, витікає, що для надійної роботи ГТУ ГПА необхідно, щоб в камеру згорання не попадали рідкі вуглеводні і вода у вигляді крапель.

Існує ряд методів видалення дисперсної фази з газового потоку. До основних методів можна віднести фільтрування з метою видалення крапель рідини і механічних домішок. Другий спосіб – випаровування дисперсної фази для отримання гомогенного потоку.

Мета роботи

Підвищення надійності роботи ГТУ ГПА.

Дослідження процесів в масообмінному елементі фільтр-сепаратора

Аналітичне дослідження процесів тепломасообміну при випаровуванні рідини в масообмінній частині фільтр-сепаратора практично не можливе в зв'язку зі складністю отримання рішення математичної моделі процесу при відповідних граничних умовах. В зв'язку з цим, було виконано комплекс експериментальних досліджень з метою отримання емпіричних залежностей.

Дослідження масообміну при випаровуванні рідини дозволили виявити зміну інтенсивності по довжині каналу масообмінної частини. А саме, наявність початкової ділянки і ділянки стабілізованого теплообміну. На рис. 1 представлена характерна зміна інтенсивності масовіддачі в залежності від швидкості газу.

Таким чином, дослідження процесів охолодження повітря в умовах вимушеної конвекції при контакті з гравітаційною ізотермічною плівкою рідини показав нелінійний характер зміни інтенсивності тепломасообміну. Максимальна інтенсив-

ність процесів реалізується на початковій тепловій ділянці. Враховуючи особливості процесу випаровування довжина початкової теплової ділянки визначалась в залежності від режимних параметрів контактуючих фаз за умови, що зміна коефіцієнта тепловіддачі на початковій ділянці не перевищуватиме його середнього значення на цій ділянці більш ніж на 1%. На підставі отриманих результатів були визначені довжини початкових теплових ділянок в залежності від режимних параметрів контактуючих фаз і геометричних характеристик каналу [4].

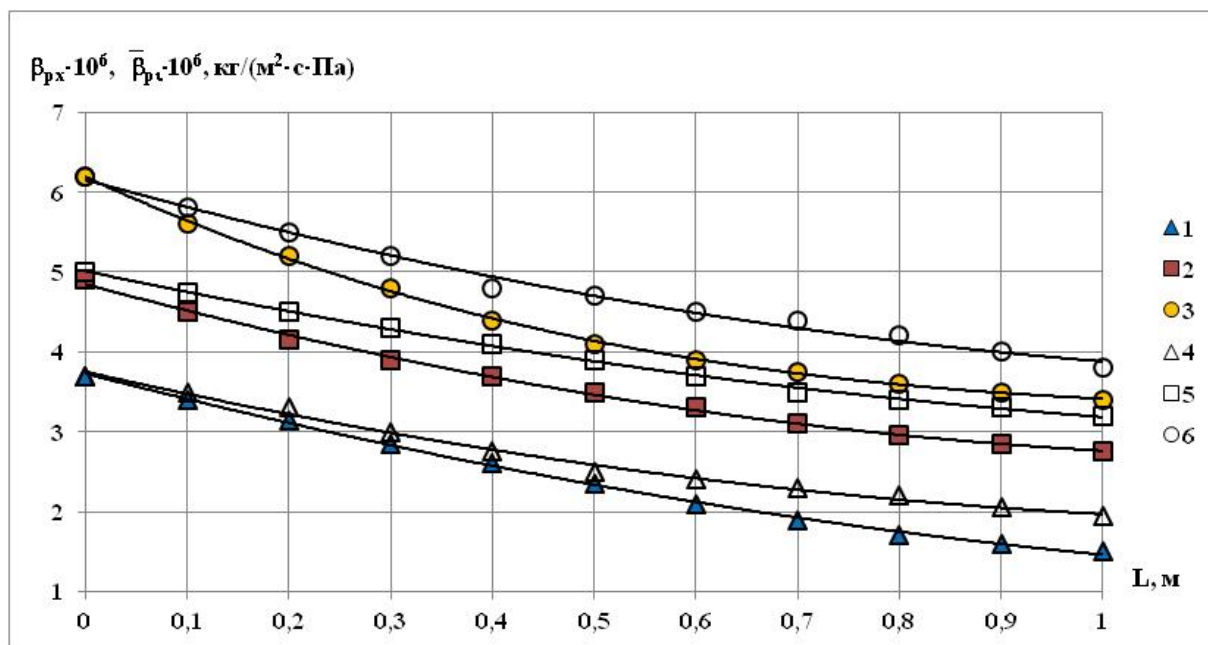


Рис. 1 – Локальний (1, 2, 3) та середній (4, 5, 6) коефіцієнти масовіддачі при охолодженні газу в залежності від його швидкості при постійних температурі на вході та густині зрошення.

Температура газу на вході в канал $t'_2 = 150$ °С, густина зрошення $\Gamma = 0,0746$ кг/(м·с):

1, 4 – швидкість 1,29 м/с; 2, 5 – 2,64 м/с; 3, 6 – 8,94 м/с

При узагальненні експериментальних даних були отримані емпіричні залежності, які дозволяють визначити локальну і середню масовіддачу при ламінарному режимі руху газу на початковій ділянці і ділянці стабілізації процесу:

- Для початкової теплової ділянки:
 - локальна масовіддача при ламінарному режимі руху газу

$$\text{Nu}_{Dx} = 0,62 \text{Re}_x^{0,5} \text{Pr}_{Dx}^{0,33} K_x^{0,25} \left(\frac{x}{d_e} \right); \quad (1)$$

- середня масовіддача при ламінарному режимі руху газу

$$\text{Nu}_{Dx} = 0,78 \text{Re}_\ell^{0,5} \text{Pr}_{D\ell}^{0,33} K_\ell^{0,25} \left(\frac{\ell}{d_e} \right). \quad (2)$$

- Для ділянки стабілізованого процесу:
 - середня масовіддача при ламінарному режимі руху газу

$$\bar{\text{Nu}}_D = 0,58 \text{Re}^{0,5} \text{Pr}_D^{0,33} K^{0,25}. \quad (3)$$

Практична реалізація результатів дослідження процесів в масообмінному елементі

Для газоперекачуючих агрегатів, що встановлені на сховищах підземного зберігання газу, умови експлуатації яких відрізняються підвищеним вмістом механічних часток, був розроблений фільтр-сепаратор. Фізико-хімічні властивості газового конденсату, який відібрано з сепараторів компресорної станції (КС) Дочірнього підприємства «Укртрансгаз», представлено в табл. 1.

Таблиця 1 – Фізико-хімічні властивості газового конденсату

Склад газового конденсату	Діапазон змін
густина	700...800 кг/м ³
в'язкість кінематична	(0,6...1,1)·10 ⁻⁶ м ² /с
вміст загальної сірки	до 1,1 %
Склад за фракціями:	
початок кипіння	40...63 °С
10 % об.	50...82 °С
50 % об.	94...133 °С
90 % об.	174...287 °С

Фільтр-сепаратор має фільтр тонкого очищення та масообмінний елемент. Таким чином, в цьому апараті поєднані принципи механічного очищення та масообмін з метою отримання паливного газу необхідної якості. Паливний газ через вхідний патрубок потрапляє у сепараційну камеру фільтр-сепаратора. За рахунок відцентрових сил відбувається сепарація твердих часток, крапель газового конденсату і води. Для запобігання вторинного виносу рідини, стінки фільтра-сепаратора вкриті сіткою із сталі 12Х18Н9Т. Відсепарована рідина за рахунок гравітаційних сил стікає у нижню частину корпусу фільтр-сепаратора по зазору між стінкою та шаром сітки. Далі паливний газ поступає в масообмінну частину фільтр-сепаратора.

Масообмінний елемент виготовлено з гофрованої сітки 2-063-025 12Х18Н9Т ГОСТ 3826-82, яка утворює канали. Краплі газового конденсату і води контактують з поверхнею насадки, утворюючи плівку. При цьому відбувається фракціонування газового конденсату – частина легких фракцій випаровується, а залишок рідини коагулюється в нижній частині елементу і у вигляді великих крапель відривається від торця та попадає в нижню частину корпусу фільтр-сепаратора. Накопичена рідина видаляється за допомогою продувки в збірну ємкість.

Після проходження масообмінного елементу фільтр-сепаратора паливний газ поступає на двоступеневий фільтр тонкого очищення. Внаслідок проходження через шар пористого матеріалу типу *Sinfasan* і лавсанового паперу паливний газ остаточно очищується від механічних часток пилу та іржі. Очищений газ поступає у вхідний патрубок фільтр-сепаратора і далі – на блок стопорних і регулюючих клапанів ГТУ ГПА.

Результати випробування дослідного зразка фільтр-сепаратора

Дослідно-промислове випробування показало, що визначальним параметром, який впливає на роботу апарату, є температура паливного газу на його вході.

При постійній концентрації рідких вуглеводнів, рівній $K = 0,08...0,09$ кг/м³, температурі паливної суміші $T = 448$ К кількість залишку досягла 43 % від загальної кількості газового конденсату, що подається в контактний апарат, а при температурі $T = 594$ К вона складала всього 9 %. В останньому випадку температура паливної суміші і газового конденсату, що випарувався, на виході з апарату складала $T = 507$ К при тиску $P = 0,39$ МПа, тобто в ньому випарувалися практично тільки бензинові і газові фракції, попадання яких в паровій фазі в камеру згорання не знижує надійності роботи ГТУ.

Це підтверджується і аналізом проб залишку, що не випарувався, результати яких приведені в табл. 2. Він є сумішшю важких вуглеводневих фракцій, масла і механічних домішок. Температура початку кипіння фракцій, що входять в цю суміш знаходиться в діапазоні $T = 453...503$ К (залежно від температури відбору проб).

Молекулярна вага залишку, що не випарувався, приблизно в 2 рази вища, ніж у початкового газового конденсату і складає приблизно 250...280. При розгонці по ГОСТ 2777-66 вдалося відігнати при температурі $T = 573$ К (12...42) % досліджуваних проб залишку, що не випарувався. Кінематична в'язкість залишку різко збільшилася в порівнянні з початковим газовим конденсатом і складала при $T = 323$ К $(6,4...11,95) \cdot 10^{-6}$ м²/с залежно від температури відібраної проби, тоді як кінематична в'язкість при $T = 293$ К початкового газового конденсату складала $(1,02...1,4) \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Вміст сірки в пробах залишку в 4...5 разів вище, ніж у початковому конденсаті і складає (0,154...0,2) %. Внаслідок цього пара газового конденсату, що поступає до штатних пальників ГТУ, містила сірки всього (0,02...0,025) %. Таким чином, використання фільтр-сепаратора в системі паливоприготування ГТУ виключає попадання в камеру згорання не тільки важких вуглеводневих з'єднань, механічних домішок, але і сірки. Завдяки цьому вдається уникнути сірчатої корозії устаткування, що виникає при попаданні рідких вуглеводнів в краплинному вигляді в камеру згорання ГТУ.

Таблиця 2 – Фракційний склад залишку, важких вуглеводневих фракцій газового конденсату

Температура відбору проб при P = 0,4 МПа	Кількість залишку в % до поданого конденсату	Густина при T = 293 К, кг/м ³	Вязкість кінематична при T = 293 К, ·10 ⁶ м ² /с	Вязкість кінематична при T = 323 К, ·10 ⁶ м ² /с	Вміст сірки %	Теплотворна здатність нн-жча, робоча, кДж/кг	Молекулярна маса	Фракційний склад, вихід в % об'єму								
								Н.К., К	433 К	453 К	473 К	493 К	513 К	533 К	553 К	573 К
293	—	773	1,4	—	0,067	42608	133,81	328	53,5	62	68	73	78	83	88	91
478	13,2	842	—	6,44	0,16	43165	274,62	453	—	—	3,0	5,0	8,0	11,05	21	42
485	12,7	842	—	6,83	0,155	42981	—	413	0,5	1,0	2,0	4,0	7,0	11,0	19	32
505	4,9	852	—	11,95	0,2	43203	—	493	—	—	—	—	1,0	2,0	5,0	12
507	9,0	837	—	6,32	0,12	43157	—	451	—	—	1,0	3,0	5,0	10,0	19	35
504	3,5	847	—	9,36	0,154	42700	—	513	—	—	—	—	—	2,0	7,0	19
293	—	753	1,02	—	0,041	41028	—	318	70	79	83	87	89	92	96	97

Висновки

1 На підставі одержаних результатів дослідження процесів тепломасообміну в масообмінному елементі фільтр-сепаратора отримані емпіричні залежності для визначення інтенсивності процесу масообміну на початковій ділянці і ділянці стабілізованого процесу.

2 На основі експериментальних досліджень був розроблений фільтр-сепаратор паливного газу призначений для одержання гомогенного палива шляхом видалення твердих часток та фракціонування газового конденсату і води, що знаходяться у природному газі у вигляді крапель, з наступною сепарацією важких вуглеводневих фракцій та механічних домішок.

Список літератури

- 1 Пчёлкин, В. В. Воздухоочистительные устройства – этапы развития. ООО «ВНИИГАЗ» [Текст] / В. В. Пчёлкин, О. В. Лисицына, С. Н. Подлегаев, Л. А. Прокофьев, Д. И. Сивков // Газотурбинные технологии. – 2007. – № 4(51). – С. 32–37. – ISSN 2311-2646
- 2 Шваб, Ю. Сравнительный анализ различных систем фильтрации, применяемых на ГТУ в России [Текст] / Ю. Шваб, А. Богдан // Газотурбинные технологии. – 2009. – № 5(78). – С. 16–20. – ISSN 2311-2646.
- 3 Пчёлкин, В. В. Качество подготовки газа в технологических процессах компрессорных станций [Текст] / В. В. Пчёлкин, С. Н. Подлегаев, Д. И. Сивков, О. В. Лисицына // Газотурбинные технологии. – 2008. – № 3(64). – С. 38–42. – ISSN 2311-2646.
- 4 Туз, В. О. Тепло- і масообмін при охолодженні повітря гравітаційно стікаючою ізотермічною плівкою [Текст] / В. О. Туз, Н. Л. Лебедь // Труды XV Ме-

ждународной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии». – Политехперіодика. – Одеса, 2014. – С. 29–30. – ISSN 2308-8060.

Bibliography (transliterated)

- 1 Pcholkin, V. V., Lisicyna, O. V., Podlegaev, S. N., Prokofev, L. A. and Sivkov, D. I. (2007), "Vozduhoochistitel'nye ustrojstva - jetapy razvitiya. OOO "VNIIGAZ" [Air pollution control devices – stages of development of LLC "VNIIGAZ"]", *Gazoturbinnye tehnologii [Gas turbine technology]*, no. 4 (51), pp. 32–37. – ISSN 2311-2646.
- 2 Schwab, J. and Bogdan, A. (2009), "Svravnitel'nyj analiz razlichnyh sistem fil'tracii, primenjaemyh na GTU v Rossii [A comparative analysis of the various filtration systems used in gas turbines in Russia]", *Gazoturbinnye tehnologii [Gas Hydraulic technology]*, no. 5(78), pp. 16–20. – ISSN 2311-2646.
- 3 Pcholkin, V. V., Podlegaev, S. N., Sivkov, D. I. and Lisicyna, O. V. (2008), "Kachestvo podgotovki gaza v tehnologicheskikh processah kompressornyh stancij [The quality of the gas in the preparation processes of compressor stations]", *Gazoturbinnye tehnologii [Gas turbine technology]*, no. 3(64), pp. 38–42. – ISSN 2311-2646.
- 4 Tuz, V. O. and Lebed, N. L. (2014), "Teplo- i masoobmin pri oholodzhenni povitrya gravitacijno stikajuchoju izotermichnoju plivkoju [Heat and mass exchange during cooling of the air by the gravitationally draining isothermal film]", *Materiali HV Mizhnarodnoi naukovopraktichnoi konferencii "Sovremennye informacionnye i jelektronnye tehnologii" 26 May 2014, Odessa [Proceedings of the XV International scientific conference "Modern Electronic Clearing and technologies" 26 May 2014, Odessa]*. – ISSN 2308-8060.

Відомості про авторів (About authors)

Туз Валерій Омелянович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри атомних електричних станцій і інженерної теплофізики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна; e-mail: valerituz56@gmail.com.

Tuz Valerii Omelianovych – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor at the Department of Nuclear Power Stations and Thermal Physics Engineering, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine.

Трокоз Ярослав Євгенович – старший науковий співробітник кафедри атомних електричних станцій і інженерної теплофізики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна; e-mail: yar_t@ukr.net.

Trokoz Yaroslav Yevhenovych – Senior Research Officer at the Department of Nuclear Power Stations and Thermal Physics Engineering, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine.

Лебедь Наталія Леонідівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри атомних електричних станцій і інженерної теплофізики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна; e-mail: nata.lebeddom@gmail.com.

Lebed Nataliia Leonidivna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor at the Department of Nuclear Power Stations and Thermal Physics Engineering, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Туз, В. О. Тепломасообмін в фільтр-сепараторі паливної системи ГТУ ГПА [Текст] / **В. О. Туз, Я. Є. Трокоз, Н. Л. Лебедь** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 10(1182). – С. 25–29. – Бібліогр. : 4 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.03.

Please cite this article as:

Tuz, V. O., Trokoz, Ya. Ye., Lebed, N. L. (2016), "Heat-Mass Exchange in the Separating Filter of Fuel System for the Gas Turbine Plant of Gas-Compressor Unit", *Bulletin of NTU "KPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 10(1182), pp. 25–29, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.03.

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Туз, В. О. Тепломасообмен в фильтр-сепараторе топливной системы ГТУ ГПА [Текст] / **В. О. Туз, Я. Е. Трокоз, Н. Л. Лебедь** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 10(1182). – С.25–29. – Бібліогр. : 4 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.03.

АННОТАЦИЯ На основе экспериментальных исследований процессов при испарении жидкости в массообменном элементе получены эмпирические зависимости для расчета локальной и средней массоотдачи на начальном участке и участке стабилизированного процесса, разработан фильтр-сепаратор топливного газа, который предназначен для получения гомогенного топлива. Испытания опытного образца показало, что использование фильтр-сепаратора в системе топливоприготовления ГТУ исключает попадание в камеру сгорания тяжелых углеводородных соединений, механических примесей и серы.

Ключевые слова: газотурбинная установка (ГТУ), газоперекачивающий агрегат (ГПА), фильтр-сепаратор, тепломасообмен.

Надійшла (received) 14.01.2016