

УДК 621.43.068.4(045)

¹О.І. Запорожець, д.т.н., проф.
²В.І. Савченко, к.т.н., с.н.с.
³С.В. Карпенко, н.с.

ОБҐРУНТУВАННЯ НОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ОСЬОВИХ КОМПРЕСОРИВ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК

Національний авіаційний університет
E-mail: ¹zap@nau.edu.ua
E-mail: ²victor_savchenko@ukr.net
E-mail: ³karpenko_serg@ukr.net

Проведено аналіз існуючих методів очищення поверхонь лопаток осьових компресорів газотурбінних установок. Запропоновано метод очищення поверхонь лопаток осьових компресорів газотурбінних установок з використанням низькотемпературних гранул льоду.

Проведен анализ существующих методов очистки поверхностей лопаток осевых компрессоров газотурбинных установок. Предложен новый метод очистки поверхностей лопаток осевых компрессоров газотурбинных установок с использованием низкотемпературных гранул льда.

There was made an analysis of existent methods for cleaning of blades surface for axial-flow compressors of gas-turbine machines. Proposed new method for cleaning of blades surface for axial-flow compressors of gas-turbine machines is based on using of low-temperature ice granules.

Вступ

Однією із проблем енергозбереження є зменшення витрат природного газу газотранспортними компаніями.

Наприклад, загальна потужність газотурбінних установок (ГТУ), які застосовуються як приводи газоперекачувальних агрегатів (ГПА) природного газу в магістральних газопроводах ДК «Укртрансгаз», становить близько 4000 МВт.

З урахуванням того, що на 1 МВт потужності витрачається близько 300 м³/год паливного газу, витрати паливного газу на роботу всього парку ГТУ становлять 9,6 млрд. м³/р.

Економія природного газу, який застосовується як паливний газ для ГТУ, це один із шляхів збереження енергоресурсів за рахунок зменшення власних витрат паливного газу ДК «Укртрансгаз».

Постановка завдання

Для зменшення витрат паливного газу існують організаційні та технічні заходи.

Одним із заходів є поліпшення технічних характеристик ГТУ та утримання їх на оптимальному рівні в процесі експлуатації ГТУ [1].

Під час роботи ГПА на лопатках осьового компресора (ОК) ГТУ відкладаються пари масла. У результаті цього на лопатках осаджується забруднення, яке завдяки високій температурі міцно зв'язується з поверхнею лопаток.

Забруднення ОК можуть викликати комахи, пил, пісок, інші тверді забруднюючі речовини, які не можуть бути повністю видалені поглинальною фільтраційною системою очищення повітря, що подається на вхід ГТУ, осаджуються на поверхнях лопаток та направляючих апаратах ОК.

Осадження експлуатаційних забруднень на поверхнях лопаток та направляючих апаратах ОК ГТУ призводять до зниження ефективної потужності та коефіцієнта корисної дії (ККД) [2].

Зайві витрати паливного газу можуть становити до 3% від оптимальних значень. Для підтримки потужності ГТУ в оптимальних технічних умовах поверхні лопаток та направляючих апаратів ОК ГТУ періодично очищують за допомогою водних розчинів технічних мийних засобів (ТМЗ), таких, як «Синвал», М1, М2, «Прогрес» або твердих органічних частинок кісточкової крихти, рису, твердої пшениці.

Проте названі способи очищення мають суттєві недоліки. Так, очищення за допомогою промивання виконується тільки під час зупинки ГТУ і тому може виконуватися тільки в період виконання ремонтних робіт на ГТУ.

Очищення за допомогою кісточкової крихти може виконуватися без зупинки ГТУ, але велика кількість дрібного пилу залишається у порожнях систем охолодження турбін та повторно відкладається на останніх ступенях ОК.

Мета роботи – вивчити можливість застосування та провести обґрунтування створення нової технології очищення ОК ГТУ від експлуатаційних забруднень, яка може бути значно ефективнішою порівняно з існуючими.

Методи очищення

Для підтримки оптимальної роботи ГТУ виконується періодичний контроль за технічними показниками компресора під час роботи ГТУ.

Збільшення витрат паливного газу у разі оптимальних атмосферних параметрах навколишнього середовища свідчить про забруднення ОК. У цьому разі потрібно здійснювати технологічну операцію очищення деталей ОК від експлуатаційних забруднень.

Для миття лопаток від експлуатаційних забруднень ГТУ зупиняють, ротор турбіни охолоджують до температури не більше 100 °С. Потім у режимі «прокручування» зі швидкістю приблизно 20% від номінальної потужності здійснюють промивання. Мийний розчин подають на лопатки ОК за допомогою форсунок. Як мийну рідину використовують водні розчини різних ТМЗ, наприклад, «Синвал». Водний розчин мийного розчину наносять на поверхню лопаток та направляючих апаратів ОК ГТУ. Миття у режимі «прокручування» пов'язано з тим, що під час миття водними розчинами ТМЗ потрібне їх осадження на поверхні деталей та подальша витримка приблизно 20–30 хв. Після цього здійснюється промивання ОК водою. Продукти очищення разом з водою, що використовувалась для промивання, видаляються через дренажні отвори в корпусі ОК. У разі проведення очищення під час режиму роботи ОК ефективність миття суттєво знижується через зменшення площі, на якій осідає розчин ТМЗ, а також через зменшення часу взаємодії забруднення з розчином ТМЗ [3].

Система рідинного очищення складається з устаткування для подачі мийного засобу, розподільних колекторів і форсунок.

Форсунок встановлюються так, щоб вони не виступали в межі проточної частини і разом з тим рівномірно розподіляли мийний розчин у потоці повітря. Конструкція форсунок повинна виключати можливість потрапляння будь-яких деталей форсунок у проточну частину ОК.

Під час роботи ГТУ лопатки ОК поступово забруднюються. Це призводить до зростання температури за турбіною низького тиску (ТНТ) та падінню обертів на турбіні високого тиску (ТВТ).

Вплив промивання ОК ГТУ на температуру за ТНТ, за даними Санкт-Петербурзького ЗАТ «Орма», показано на рис. 1 [4].

Для промивання використовують рідини ТМЗ М-1 виробництва «Лемікс».

Результати виробничих іспитів миття ОК ГТУ водними розчинами ТМЗ, що проводилися фірмами «Nuovo Pignone» і «ОРМА», свідчать, що під час миття ОК ГТУ площа промивання поверхні лопаток становить не більше 40–50% їх загальної площі для 1–5 ступеня та 20–30% для 6–10 ступеня.

Таким чином, такий спосіб миття є недостатньо ефективним.

Спосіб очищення за допомогою твердих органічних частинок більш ефективний порівняно з промиванням водними розчинами ТМЗ. Однак у разі використання такого способу очищення за рахунок інтенсивного руйнування твердих частинок у разі їх зіткнення з поверхнею рухомих деталей ОК ГТУ утворюється велика кількість дрібнодисперсного пилу. Такий пил, середній розмір частинок якого від 0,5 до 5 мкм, осідає на покритих масляною плівкою поверхнях деталей, що ще більше їх забруднює.

Крім того, разом з повітрям, яке відбирається з ОК для охолодження вузлів та деталей ГТУ, пил потрапляє в порожнини деталей ГТУ, які охолоджуються повітрям, наприклад, соплових апаратів та перфорованих лопаток, що знижує їх робочі характеристики. У технічних рекомендаціях фірми «Nuovo Pignone» вказано, що очищення органічними частинками слід проводити після попереднього миття ОК ГТУ водними розчинами ТМЗ, щоб виключити можливе вторинне осідання пилу на поверхню деталей із масляною плівкою.

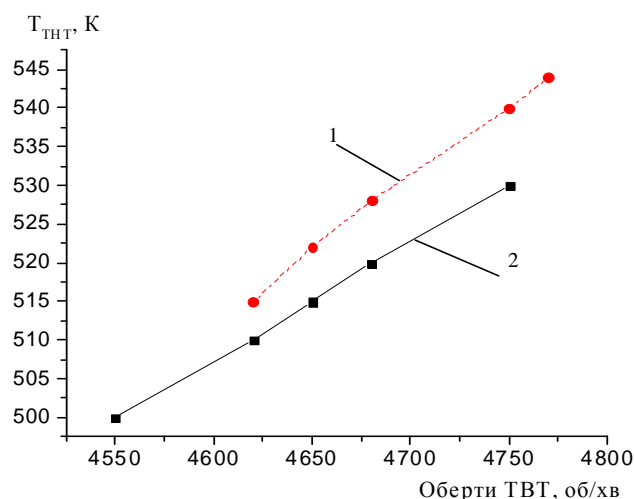


Рис. 1. Вплив промивання компресора на температуру за ТНТ:
1 – до промивання;
2 – після промивання

Такий спосіб очищення застосовують поєднуючи з допоміжним миттям ОК ГТУ водними розчинами ТМЗ. Однак, оскільки майже всі типи турбін сучасних ГТУ мають велику номенклатуру деталей з внутрішніми каналами для їх охолодження, очищення з побічним продуктом у вигляді дрібнодисперсного пилу недоцільне.

Промивання ОК проводять під час зупинки ОК на поточний ремонт через 8000 год напрацювання. Згідно з даними фірми «Nuovo Pignone», помітне зниження робочих параметрів ГТУ через забруднення ОК спостерігається вже через 1500 год роботи ГТУ. Це призводить до зниження ефективної потужності та ККД за деяким спостереженням до 10 і 2 % відповідно.

Недоліки зазначених способів очищення потребують пошуку нових більш ефективних методів миття ОК ГТУ.

Один із нових способів очищення поверхонь запропонований фірмою «GOLD JET Inc» [5], заснований на використанні сухого льоду – твердої форми вуглекислого газу CO_2 . Температура сухого льоду $-78,33\text{ }^\circ\text{C}$. Принцип очищення сухим льодом ідентичний піскоструминному способу. Гранули сухого льоду прискорюються у форсунці за допомогою струменя стислого повітря й вистрелюються на поверхню, що очищують.

Ефект очищення досягається за рахунок не абразивної дії, а за здатності сухого льоду до сублімації. Під час удару об поверхню гранули миттєво випаровуються, а оскільки об'єм вуглекислого газу перевищує об'єм сухого льоду приблизно у 800 разів, на поверхні відбуваються мікроривування, з допомогою яких очищується поверхня. Утворення великої кількості вуглекислого газу під час сублімації сухого льоду в ОК ГТУ можуть призвести до негативного впливу на процес згоряння палива в камері згоряння ГТУ, якщо очищення за таким способом виконується під час роботи ГТУ. Тому використання технології очищення ОК ГТУ сухим льодом під час роботи ГТУ також недоцільне.

Відома технологія очищення поверхонь від забруднення фірми «IceBlast» [6] за допомогою льоду, отриманим заморожуванням води.

Частинки льоду, розігнані струменем стислого повітря, з великою швидкістю зіштовхуються з поверхнею, що очищують. Ефект очищення поверхонь від забруднення засновано на трьох фазах, що діють одночасно.

Перша фаза – первинний стан (лід), частинки льоду з великою швидкістю та значною обертальною силою атакують забруднення. У тому випадку, якщо обертальна сила частинки більша сили, яка утримує забруднення на поверхні, здійснюється його зміщення.

Друга фаза – зміна стану (лід з водою). У момент зіткнення з поверхнею, що очищається, відбувається деформація частинки льоду за рахунок його кристалічної структури.

Деформована частинка продовжує рух, шукаючи виходу своєї кінетичної енергії. Ефект скобління, що виникає внаслідок цього, володіє здатністю до очищення.

Третя фаза – кінцевий стан (вода). Вода, яка утворилась від танення льоду, також видаляє забруднення.

У разі очищення кристалічним льодом під час зіткнення гранул із твердою поверхню кінетична енергія частинки льоду витрачається на розтавання льоду. Взаємодія льоду кристалічної структури здійснюється в три етапи:

- 1) момент контакту;
- 2) стискання кристалічних ґрат льоду;
- 3) перетворення кінетичної енергії в теплову за рахунок стискання кристалічних ґрат льоду і розтавання льоду та перетворення його у воду.

Таким чином, під час очищення льодом, який отриманий заморожуванням води і має кристалічні ґрати, під час зіткнення з твердою поверхнею відбуватиметься деформація його кристалічних ґрат з виділенням тепла, що призводить до розтавання льоду (рис. 2).

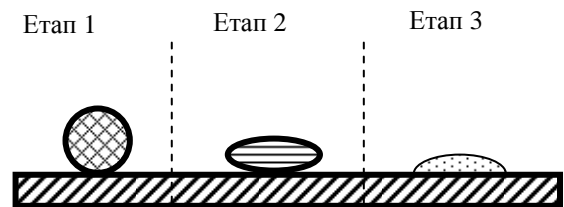


Рис. 2. Схема взаємодії льоду з ґратками кристалічної структури

Очищення таким льодом не є високоефективним. Щоб енергія зіштовхування витрачалася більше на очищення поверхні, а не на розтоплення льоду, пропонується використовувати лід з іншою структурою.

Нова технологія очищення

На сьогодні відомо майже дванадцять модифікацій кристалічного льоду і три фази аморфного льоду, який може існувати за різного тиску та температури.

Аморфний лід не має кристалічних ґрат. Він існує у трьох формах [7]:

- аморфний лід низької щільності, який утворюється за атмосферного тиску та нижче;
- аморфний лід високої щільності;
- аморфний лід дуже високої щільності, який утворюється за високого тиску.

Лід низької щільності можна отримати за атмосферному тиску, що значно спрощує технологію його виробництва. Такий лід імовірно повинен мати фізичні властивості, які можуть бути ефективні в разі його використання для очищення поверхонь.

Отримати лід з аморфною структурою можливо лише в умовах достатньо швидкого охолодження води (порядку 1×10^6 К в секунду). За таких умов молекули води не встигають сформувати кристалічні ґрати [7–12]. Якщо температура води менша за -140 °С, рухомість молекул води настільки падає, а в'язкість зростає, що вода утворює склоподібне тверде тіло з аморфною структурою, яка властива рідинам. При цьому в області невисокого тиску утворюється аморфна фаза низької щільності, а в області підвищених – аморфна фаза високої щільності, тобто вода демонструє поліаморфізм. Якщо змінювати тиск або температуру, одна аморфна фаза стрибком переходить в іншу з несподівано великим змінням щільності.

Якщо побудувати модель процесу очищення поверхні гранулами льоду з аморфною (склоподібною) структурою ґрат, то ймовірно такий лід, зіштовхуючись з поверхнею, буде розтавати лише в зоні контакту гранули з поверхнею (рис. 3).

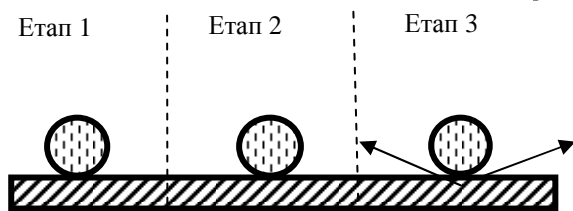


Рис. 3. Схеми взаємодії гранул льоду з ґратами аморфної структури

Аморфний лід може дробитися в момент зіткнення з твердою поверхню, але частки подрібненого льоду все одно будуть виконувати свою робочу функцію.

Процес контакту гранули льоду з поверхнею становить близько 1×10^{-5} с, що можна вважати миттєвим контактом. Але, якщо розкласти момент удару гранули об поверхню, отримаємо три етапи:

- 1) момент контакту;
- 2) утворення води в зоні контакту гранули льоду з поверхнею;
- 3) витискування води з зони контакту тиском за рахунок інерційних сил гранули й утворення кумулятивного ефекту.

Струмінь має високу енергією, здатну ефективно видаляти будь-які забруднення.

Під час удару за рахунок імпульсу сил, які виникають у зоні удару, вода видавлюється з великою швидкістю з-під гранули. Імовірно, лід із аморфною структурою, зіштовхуючись із поверхнею, не розтаватиме, зберігаючи свою кінетичну енергію.

Досягти вищих результатів під час очищення ОК ГТУ існуючими способами можна, застосувавши нову технологію очищення, засновану на використанні низькотемпературних крижаних гранул з особливими фізичними властивостями, отриманих спеціальною технологією охолодження води.

У ході проведення експерименту були отримані гранули низькотемпературного льоду аморфної структури (рис. 4).

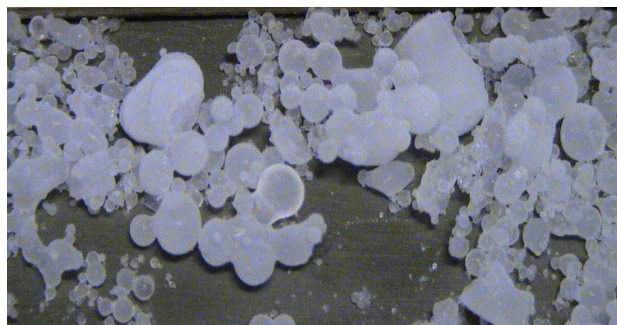


Рис. 4. Гранули льоду, заморожені в рідкому азоті

Низькотемпературний лід був отриманий за допомогою холодоагенту. Як холодоагент використовували рідкий азот.

У ході проведення експерименту вода вприскувалась в ємність з рідким азотом, де вона перетворювалась у гранули.

Для досягнення льодовими гранулами всіх ступенів ротора ОК було б доцільно використовувати гранули з різним геометричним розміром. І тоді можна передбачити, що під час очищення гранули більшого розміру будуть зіштовхуватися з лопатками ротору ОК перших ступенів, роздвігнутися, підхвачуватися потоком повітря і досягати останніх ступенів ротора ОК.

Використання полідисперсного складу повинно підвищити ефективність очищення ротора ОК.

Вплив газотурбінних установок на навколишнє середовище

Забруднення лопаток ОК, окрім зниження ККД і потужності ГТУ, також впливає на емісію шкідливих викидів, зокрема NO_x . За даними досліджень [7] зниження коефіцієнта надлишку повітря на 0,5% призводить до зростання викидів NO_x на 20 мг/м^3 (рис. 5).

Оптимальні параметри роботи ОК впливають на економічні показники роботи ГТУ за рахунок економії витрати паливного газу та підвищення екологічної безпеки доквілля. За рахунок періодичного очищення ОК від експлуатаційних забруднень можливе підтримання роботи ГТУ в оптимальному режимі в термін міжремонтних періодів експлуатації.

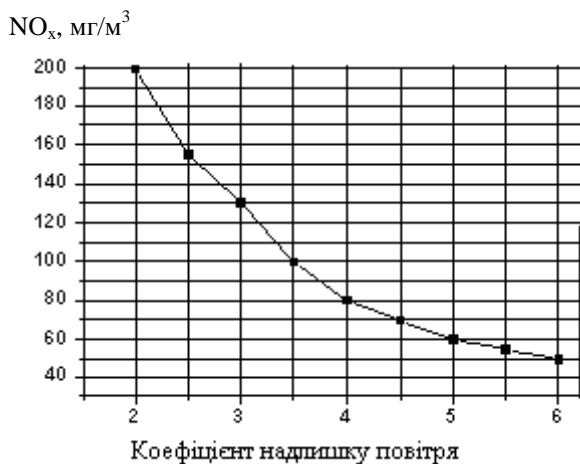


Рис. 5. Залежність викидів NO_x від коефіцієнта надлишку повітря ГТУ

Досвід експлуатації ГТУ різних типів показує, що помітне зниження робочих параметрів ОК через експлуатаційне забруднення лопаток, відбувається приблизно через 1500–2000 год роботи. Характеристику зміни емісії шкідливих викидів від напрацювання ГТУ показано на рис. 6.

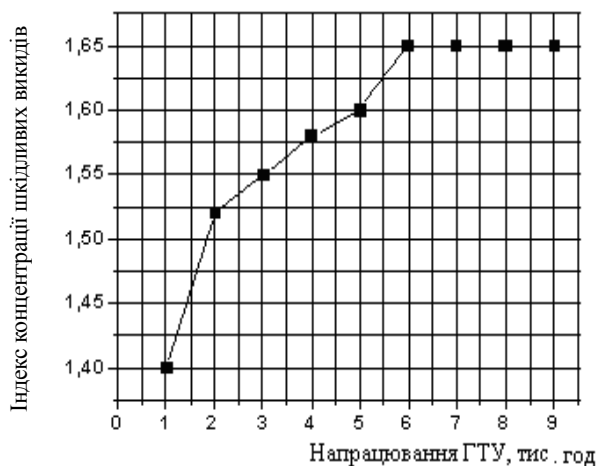


Рис. 6. Залежність збільшення індексу шкідливих викидів від напрацювання ГТУ

З рис. 5 видно, що інтенсивне підвищення шкідливих викидів відбувається в межах перших 2000 год роботи ГТУ, тобто в період зниження ефективності роботи ОК ГТУ в результаті експлуатаційних забруднень.

Перевищення емісії NO_x, наприклад, для ГТУ потужністю 10 МВт у разі 6000 год роботи ГТУ (під час роботи з забрудненим компресором) відносно граничного нормованого рівня емісії NO_x для даного типу ГТУ в 100 мг/м³ або 260 т за 6000 год роботи становить додаткові 52 т за 6000 год.

Таким чином, за рахунок періодичного очищення ОК ГТУ є можливість суттєвого зниження емісії шкідливих викидів під час роботи ГТУ, що призведе до зменшення викидів шкідливих речовин забруднення довкілля під час експлуатації ГТУ на магістральних газопроводах.

Висновки

Результати аналізу існуючих методів очищення ОК від експлуатаційних забруднень та їх впливу на робочі параметри ГТУ показали, що очищення ОК потребують розроблення нових способів очищення ОК. Запропонована нова технологія очищення деталей та вузлів ОК ГТУ значно ефективніша за існуючі технології та може використовуватися під час роботи ГПА без його зупинки.

Література

1. Щуровский В.А. Газотурбинные газоперекачивающие агрегаты / В.А. Щуровский, Ю.А. Зайцев. – М.: Недра, 1994. – 192 с.
2. Орберг А.Н. О модернизации газоперекачивающих агрегатов ГТК-10-4 / А.Н. Орберг, В.В. Виноградов, С.И. Третьяков // Газовая промышленность. – 1998. – № 4. – С. 98–99.
3. Oil and Gas. – Режим доступу: http://www.geenergy.com/businesses/geoilandgas/en/literature/en/downloads/onoffline_washing.pdf.
4. Установка жидкостной очистки компрессора. – <http://www.orma.ru/regionresours.htm#Начало>
5. The rising star in industrial cleaning applications. – <http://www.coldjet.com/en/index.php>.
6. Cleaning with dry ice. – Режим доступу: <http://www.dryiceblastcleaning.com/>
7. Золотухин И.В. Фракталы в физике твердого тела / И.В. Золотухин // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 7. – С. 108–113.
8. Маэно Н. Наука о льде / Н. Маэно. – М.: Мир, 1988. – 231 с.
9. Богородский В.В. Лед / В.В. Богородский, В.П. Гаврило. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 384 с.
10. Hobbs P.V. Ice Physics / P.V. Hobbs. – Oxford: Univ. Press, 1974. – 864 p.
11. Зацепина Г.Н. Физические свойства и структура воды / Г.Н. Зацепина. – М.: МГУ, 1998. – 184 с.
12. Mishima O. The Relationship between Liquid, Supercooled and Glassy Water / O. Mishima, E. Stanley // Nature. – 1998. – Vol. 396. – P. 329–335.