

УДК 504.064:504.3.054:62-135(045)

**ЗАПОРОЖЕЦЬ О. І., д.т.н., проф.; КАРПЕНКО С. В., с.н.с.; ПУЗІК С. О. к.т.н.; САГАЙДАК Б. В.  
ТОВ «Оператор газотранспортної системи України»  
Національний авіаційний університет**

## **ІНВЕНТАРИЗАЦІЯ ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮВАЛЬНИХ РЕЧОВИН В АТМОСФЕРУ ІЗ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ**

*Окреслено проблему методичного забезпечення інвентаризації викидів забруднювальних речовин із газотурбінних установок газоперекачувальних агрегатів. Проаналізовані літературні джерела із зазначеної проблеми, які свідчать про недостатнє їх висвітлення. Вивчені максимально разові і середньодобові граничнодопустимі концентрації забруднювальних речовин в атмосферному повітрі. За двома діючими методиками проведено обчислення масового і валового викидів діоксиду вуглецю та оксидів азоту за вихідними даними про витрати та склад використаного палива, співставленні результати розрахунків..*

*Розрахунковим методом визначено значення приземної концентрації викидів газоповітряної суміші із газотурбінної установки на відстань до місця де очікується її максимальна концентрація під час несприятливих метеорологічних умов.*

*Для оцінювання ефективності використання розглянутих методик інвентаризації викидів забруднювальних речовин із газоперекачувальних установок в атмосферу розроблено схему взаємозв'язку об'єкту оцінювання ефективності з об'єктом, що обслуговується.*

*Запропоновано, розроблення єдиної методики із зазначеної проблеми .*

**Ключові слова:** атмосфера, викиди, гранично допустимі концентрації, забруднювальні речовини, інвентаризація, газотурбінні установки, екологічна безпека.

**DOI: 10.20535/2617-9741.3.2021.241059**

© Запорожець О. І., Карпенко С. В., Пузик С. О., Сагайдак Б. В., 2021.

**Постановка проблеми.** Внаслідок науково-технічної революції, людство потерпає від надмірного забруднення шкідливими речовинами навколишнього середовища. Рівень діоксиду вуглецю CO<sub>2</sub> в атмосфері планети сягнув небаченої в історії позначки 415 млн. часток. Про це свідчать дані спостережень океанографічного інституту Скриппс (Scripps Institution), який щоденно вимірює рівень вуглекислого газу спільно з ученими національного управління з питань океану і атмосфери.

Причиною зростання рівня діоксиду вуглецю в атмосфері землі стало збільшення викидів у результаті спалення, в тому числі органічних палив, що призвело до зростання глобальних температур на 1С°, тобто до глобального потепління. Якщо така тенденція триватиме і далі, то глобальне потепління зрештою призведе до низки катаклізмів і становитиме пряму загрозу екології Землі та життю людей.

До антропогенних джерел емісії CO<sub>2</sub> в атмосферу належить спалення палива в камерах згорання газотурбінних установок (ГТУ), які застосовуються як приводи газоперекачувальних агрегатів (ГПА) природного газу на компресорних станціях магістральних газопроводів, компресорних станцій підземного зберігання газу та дотискувальні компресорні станції газовидобувних підприємств.

На даний момент проблема викидання у повітря атмосфери великої кількості парникових газів під час роботи ГТУ, основними серед яких є діоксид вуглецю CO<sub>2</sub> і закис азоту N<sub>2</sub>O – одна з причин забруднення навколишнього середовища.

Державне статистичне спостереження за викидами забруднювальних речовин та парникових газів у повітря від різних джерел здійснюється з метою отримання повної та достовірної інформації про забруднення атмосфери, як для національних потреб, так і для відображення стану виконання міжнародних зобов'язань країни у зв'язку з ратифікацією «Конвенції про транскордонне забруднення повітря на великі відстані», Стокгольмської конвенції про стійкі органічні забруднення та Рамкової конвенції ООН про зміну клімату [1].

Викиди парникових газів від роботи ГТУ також підпадають під дію Закону України «Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів» як установок спадювання палива, загальна

номінальна теплова потужність яких перевищує 20 МВт. Одним із основних принципів при цьому є точність, узгодженість, порівнянність моніторингу.

Інвентаризація викидів – систематизація інформації про розміщення джерел забруднення атмосфери на території, комплексний і кількісний склад забруднювальних речовин, що викидаються в атмосферне повітря [2].

Результати інвентаризації використовуються для:

- розроблення нормативів утворення забруднюючих речовин, які викидаються в атмосферне повітря при експлуатації технологічного обладнання об'єктів;
- розроблення нормативів гранично допустимих викидів;
- регулювання викидів забруднюючих речовин в атмосферу;
- здійснення державного обліку в галузі охорони атмосферного повітря;
- розроблення екологічних програм зі зниження викидів забруднення в атмосферу;
- розробки документів у яких обґрунтовуються обсяги викидів, для отримання дозволу на викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря стаціонарними джерелами.

Інвентаризація викидів забруднюючих речовин в атмосферу повітря здійснюється відповідно до Наказу Міністерства екології та природних ресурсів України №97 від 01.03.2017 р. «Інструкція про зміст та порядок складання звіту проведення інвентаризації викидів забруднюючих речовин на підприємстві». В інструкції подано методичні вказівки щодо відповідності змісту та правил оформлення документів для складання звіту з інвентаризації викидів забруднюючих речовин. Водночас вищезгадана інструкція не включає методику розрахунку викидів забруднень при експлуатації ГТУ ГПА. У зв'язку з цим, інвентаризація викидів забруднювальних речовин в атмосферу від ГТУ є актуальною науково-практичною задачею в галузі екологічної безпеки.

**Аналіз попередніх досліджень.** Ще два десятиліття тому розрахунки викиду забруднювальних речовин у повітря від транспорту здійснювалося трьома окремими методиками для автомобільного, залізничного, авіаційного та водного транспорту за шістьма групами хімічних речовин (оксиди вуглецю та азоту, вуглеводнями, оксидом сірки, легкими органічними сполуками, технічним вуглецем). В основу цих розрахунків були покладені статичні дані щодо споживання палива двигуном внутрішнього згорання авто, залізничним, водним, авіаційним транспортом, а також питомі викиди забруднювальних речовин, які надходять у повітря, від використання 1 тони палива.

У 2007 році до вищезгаданих методик внесені суттєві зміни і доповнення та розроблений новий порядок розрахунку, яким передбачене охоплення статистичним обліком викидів забруднювальних речовин та парникових газів [3].

Під час роботи газотурбінних установок, які є приводами газоперекачувальних агрегатів, велика кількість забруднювальних речовин викидається в навколишнє середовище.

На сьогодні ще не достатньо вивчені екологічні моделі, що описують процеси згорання в камерах згорання газотурбінних установок, утворення викидів забруднюючих речовин.

Робочий процес ГПА і хімічні реакції при згоранні газу проходять наступним чином. Атмосферне повітря через систему фільтрів подається на вихід основного компресора під тиском 0,5-0,7 МПа, за температури 180-240 °С надходить у камеру згорання, де розділяється на два потоки. Менший потік повітря бере участь у горінні палива, яке подається під тиском 1,5-2,5 МПа, а більша частина, пройшовши шлях між корпусом і жаровою трубою, слугує для оптимізації процесів згорання палива, охолоджує останню після змішування з продуктом згорання в кінці камери згорання, зменшує температуру на 700-850 °С. З камери згорання газ надходить у турбіну, яка слугує для перетворення потенціальної енергії в механічну роботу. Із газової турбіни відпрацьований газ викидається в навколишнє середовище за температури 400-450 °С.

Процес утворення шкідливих речовин проходить у камері згорання в результаті горіння суміші палива з повітрям під великим тиском. При цьому відбуваються хімічні реакції окиснення компонентів палива, яке згорає.

У камерах згорання ГТУ ГПА крім діоксиду вуглецю  $CO_2$  утворюються інші сполуки.

Для винайдення шляхів зменшення викидів з наступною їх інвентаризацією необхідно знати механізми їх утворення. Сігал І.Я. встановив, що оксиди вуглецю  $CO$  становлять близько половини від загальної кількості всіх шкідливих речовин, які надходять в атмосферу при спалюванні палива. Оксид вуглецю – високотоксична речовина і при концентрації  $CO$  в повітрі 0,01-0,02% об'єму під час вдихання викликає отруєння, а концентрація 0,2% від об'єму (2,4 мг/м<sup>3</sup>) через пів години призводить до запаморочення.

За результатом багаторічних досліджень роботи ГТУ ГПА Семчук Я. М., Чебанович Л.Б., виявили, що найбільшу кількість забруднювальних речовин протягом календарного року при видобуванні, транспортуванні, зберіганні природного газу складають: оксид вуглецю 53%, оксиди азоту – 24,5% та інші 22,3%.

Загальна наукова екологічна проблема в зоні розташування ГТУ поглиблюється ще й тим, що такі шкідливі речовини, як діоксид вуглецю можуть знаходитися в атмосфері 5-10 років; діоксиди азоту – 2,4-4 роки; метан – 4-7 років. Ці забруднювальні речовини призводять до негативних явищ, таких як парниковий ефект, кислотні дощі, а метан руйнує озоновий шар атмосфери [4, 5, 6].

Діючі газоочисні установки дають можливість знешкодити технологічно та вентиляційно викиди забруднювальних речовин з подальшою їх утилізацією. Для захисту атмосферного повітря від забруднювальних речовин застосовують наступні методи: абсорбція, адсорбція, хемосорбція, термічна нейтралізація та інші. Такі методи лише частково дозволяють зменшити концентрацію забруднень в атмосфері [7].

В роботі [1], у пункті 2.2, глави 2 Загальна частина чітко прописано, що існують такі методики:

- виконання робіт з посиланням на стандарти, нормативи, нормативно-методичну літературу та довідковий матеріал;

- по яких проводяться прямі інструментально-лабораторні вимірювання, засоби виміру, їх похибка;

- які використовуються при визначенні величини викидів розрахунковим методом.

Таким чином, не існує єдиної інтерпретації використання важливого етапу: інвентаризації викидів забруднюючих речовин, загальної проблеми негативного впливу їх на навколишнє середовище.

Роботи з удосконалення методик з урахуванням керівництва ЕМЕР/ЕЕХ від 2013 р. із інвентаризації викидів забруднювальних речовин (раніше іменоване Керівництвом із інвентаризації викидів забруднювальних речовин ЕМЕР/CORINAIR) вмщують правила оцінювання викидів забруднювальних речовин, як від антропогенних, так і природних джерел, продовжується і зараз [8].

Аналіз попередніх досліджень, присвячений інвентаризації викидів забруднювальних речовин із ГТУ ГПА, свідчить про недостатнє висвітлення цієї наукової проблеми. Рішенням зазначеної проблеми може стати оцінка фактичного стану забруднення, виявленого в результаті інвентаризації викидів ГТУ, розглянутих у попередніх методиках та їхня систематизація з подальшою розробкою єдиної методики.

**Мета** – опрацювання існуючих методик розрахунку забруднення атмосфери викидами із ГТУ ГПА в результаті їх інвентаризації з подальшою розробкою єдиної методики.

**Виклад основного матеріалу.** Концентрація забруднювальних речовин обмежується нормативним документом ДСП-201-97. Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць (від забруднення хімічними та біологічними речовинами) затверджено наказом МОЗ від 09.07.1997 р № 201.

Основними характеристиками міри забруднення атмосферного повітря є максимально разова і середньодобова граничнодопустимі концентрації забруднювальних речовин в атмосферному повітрі об'єктів.

Гранично допустимі викиди (ГДВ) – це кількість забруднювальних речовин під час викиду в повітря за одиницю часу, що не повинно бути перевищено, щоб концентрація забруднення на межі санітарної зони не була вищою ніж гранично допустима концентрація (ГДК). Першочерговими результатами є не тільки здійснення державного обліку в галузі охорони атмосферного повітря, а й розроблення нормативів гранично допустимих викидів.

ГДВ шкідливих речовин визначається за формулою:

$$ГДВ=k \cdot ГДК,$$

де  $k$  – коефіцієнт викинутого за одну секунду забруднення за допустимої норми; ГДК – гранично допустима концентрація шкідливих речовин, мг/м<sup>3</sup>.

У табл. 1 наведено ГДК деяких основних забруднювальних речовин атмосферного повітря.

**Таблиця 1 – ГДК деяких основних забруднювальних речовин атмосферного повітря**

№ п/п	Викиди	ГДК, мг/м <sup>3</sup>	
		Максимально разова	Середньодобова
1	Діоксид азоту	0,085	0,04
2	Оксид азоту	0,4	0,06
3	Оксид вуглецю	5	1

Оцінити стан навколишнього середовища ГТУ ГПА можна тільки після порівняння отриманого або вимірюваного, в результаті розрахункового методу, показника з рекомендованим стандартом.

З більш як двохсот забруднювальних речовин атмосферного повітря, на які встановлені норми ГДК, доцільно виділити: оксид азоту та вуглецю, тверді суспендовані речовини, оксиди сірки та вуглеводню, які визначаються на 90-98% валовим викидом забруднювальних речовин [3].

За результатами проведення інвентаризації і з метою заповнення річних звітів за ф. № 2-ТП (повітря) підприємствами, пропонується використовувати спрощену формулу розрахунку викиду  $j$ -ї забруднювальної речовини  $E_j$  (т), що надходить у атмосферу з димовими газами ГТУ за звітний період:

$$E_j = 10^{-6} k_j B_i Q'_i,$$

де  $E_j$  – валовий викид  $j$ -ї забруднювальної речовини під час спалювання  $i$ -го палива за звітний рік, т;

$k_j$  – показник емісії  $j$ -ї забруднювальної речовини для  $i$ -го палива, г/ГДж, визначаються згідно з діючим в Україні керівним документом ГКД 34.02.305-2002 «Викиди забруднюючих речовин в атмосферу від енергетичних установок» Методика визначення. Київ (Чинний від 01.07.2002).

$B_i$  – витрата  $i$ -го палива за звітний рік, т;

$Q'_i$  – нижча робоча теплота згорання  $i$ -го палива, МДж/кг.

Для розрахунку пропонуємо використовувати показники емісії забруднювальних речовин та нижчу робочу теплоту згорання палива, зазначені нижче.

**Розрахунковий метод (спрощений розрахунок) викидів забруднювальних речовин в атмосферу за даними про витрати та склад використаного палива і характеристики ГПА**

Витрата природного газу на рік розраховується за формулою:

$$B = X \rho,$$

де  $X$  – об'єм спожитого газу за рік, м<sup>3</sup>;

$\rho$  – густина природного газу при нормальних умовах, 0,723, кг/м<sup>3</sup>

Вихідні дані:

Витрата палива на рік –  $B$ , 400 000 м<sup>3</sup>;

Густина природного газу –  $\rho = 0,723$  кг/м<sup>3</sup>;

Нижча робоча теплота згорання палива  $Q'_i = 45,75$  МДж/кг.

Показники емісії забруднюючих речовин:

$k_{NOx} = 64,311$  г/ГДж;

$k_{CO2} = 58748,13$  г/ГДж.

Показники емісії  $k_{CO2}$  з 01.01.2021р. буде проводитись на підставі фактичного фізико-хімічного складу газу по кожній великій спалювальній установці (ГПА компресорних станцій). Фізико-хімічний склад газу щомісячно систематично публікується оператором газотранспортної системи України <https://tsoua.com/prozorist/yakist-gazu/>.

Якщо ГТУ ГПА використала за рік 400 000 м<sup>3</sup> природного газу, то її масова витрата становить

$$B = 400000 \text{ м}^3 \cdot 0,723 \text{ кг/м}^3 = 289,200 \text{ кг} = 289,2 \text{ т.}$$

1. Валовий викид оксидів азоту:

$$E_{NOx} = 10^{-6} k_{NOx} Q'_i B = 10^{-6} 64,311 45,75 289,2 = 0,853 \text{ т}$$

2. Валовий викид діоксиду вуглецю:

$$E_{CO2} = 10^{-6} k_{CO2} Q'_i B = 10^{-6} 58748,13 45,75 289,2 = 777,3 \text{ т}$$

Обчислення викидів забруднювальних речовин із ГТУ ГПА наведені в табл. 2.

**Таблиця 2 – Викидів забруднювальних речовин із ГТУ ГПА**

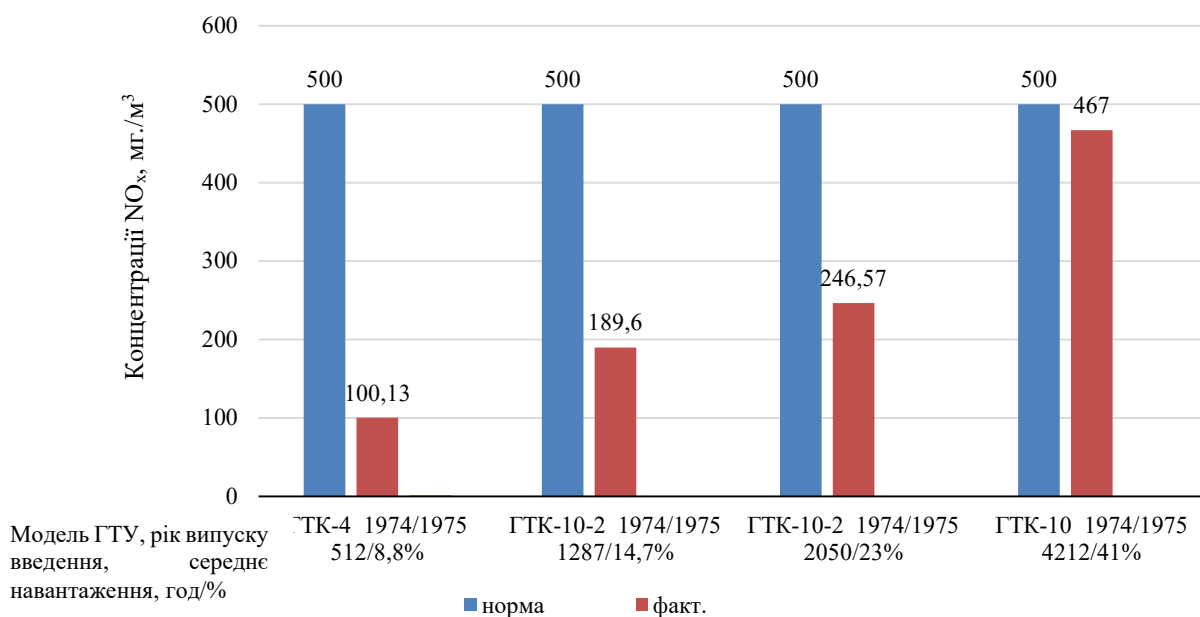
Забруднювальна речовина		Масовий викид ЗР, г/с	Валовий викид ЗР т/рік
Код технологічного процесу	Назва		
120102	Діоксид вуглецю, $CO_2$	25	777,3
120102	Оксидів азоту $NOx$	0,027	0,853

При інвентаризації викидів забруднюючих речовин використовуються матеріали:

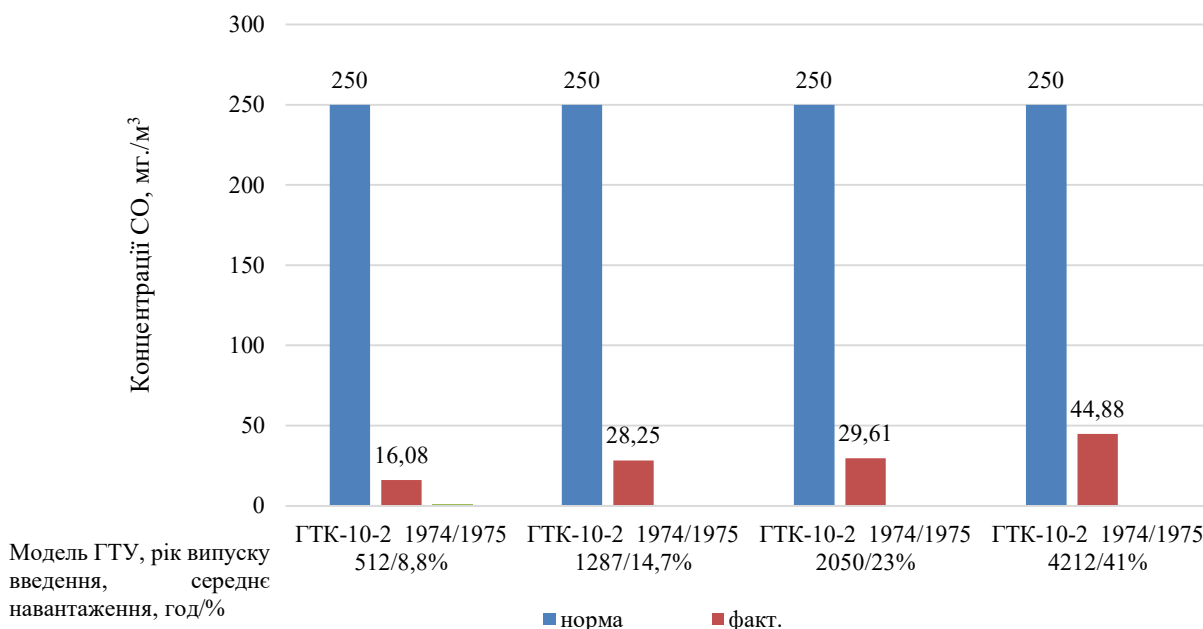
- методів прямих вимірів, які базуються на проведенні безпосередніх інструментальних вимірів;
- розрахункових вимірів або їх комбінацій

Результати проведення прямих вимірювань концентрацій забруднювальних речовин, які надходять в атмосферне повітря, від ГТУ, наведені на рис. 1, 2.

Значення фактичних і нормативних обсягів викидів NO<sub>x</sub> і CO від роботи газотурбінного обладнання номінальною тепловою потужністю від 1 до 50 МВт згідно матеріалів інвентаризації стаціонарних джерел.



**Рис. 1 – Гранично-допустимі та фактичні обсяги викидів NO<sub>x</sub> від роботи газотурбінного обладнання КС «Долина»**



**Рис. 2 – Гранично-допустимі та фактичні обсяги викидів CO від роботи газотурбінного обладнання КС «Долина»**

У результаті проведеного аналізу фактичних викидів NOx і CO від роботи газотурбінного обладнання згідно матеріалів інвентаризації стаціонарних джерел зроблено такі висновки:

- виявлено, що коливання викидів NOx і CO залежить від моделі ГТУ, терміну її випуску і введення в експлуатацію, а також середнього навантаження у годинах і %.

Фактичні обсяги NOx і CO збільшуються із зростанням середнього навантаження на ГТУ, а також терміну її випуску і введення в експлуатацію;

- відзначається тенденція до збільшення викидів NOx і CO у застарілого (більш вікового) технологічного обладнання ГТУ;

- обсяги фактичних значень ГДК NOx і CO в основному не перевищують допустимі норми відповідно до наказу міністерства охорони навколишнього середовища України №309 від 2006 р. «Про затвердження нормативів гранично-допустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел».

Нажаль, на сьогодні інструментальні виміри проводяться не систематично, в зв'язку з нестабільним режимом роботи ГТС, простим ГПА, і в такому випадку можлива відсутність періодичного інструментального моніторингу.

#### **Визначення викидів забруднювальних речовин розрахунковими методами**

Розрахункові методи визначення викиду забруднювальної речовини базується на використанні показники емісії. Показник емісії характеризує масову кількість забруднювальної речовини, яка викидається ГТУ в атмосферне повітря разом з димовими газами, віднесена до одиниці енергії, що виділяється під час згорання палива. Він залежить від багатьох чинників. Існують два показники енергії – узагальнений та специфічний.

Узагальнений показник емісії забруднювальної речовини є середньою питомою величиною викиду для певної категорії ГТУ, певної технології спалювання палива, певного виду палива з урахуванням заходів щодо зниження викиду забруднювальної речовини. Він не враховує особливостей хімічного складу палива.

Специфічний показник емісії з питомою величиною викиду, яка визначається для конкретної ГТУ з урахуванням індивідуальних характеристик палива, конкретних характеристик процесу спалювання та заходів щодо зниження викиду забруднювальної речовини.

При наявності обох показників емісії забруднювальної речовини необхідно використовувати специфічний [7].

Валовий викид  $j$ -ї забруднювальної речовини  $E_j$  т, що надходять у атмосферу з димовими газами ГТУ за проміжок часу  $\tau$ , визначається як сума валових викидів цієї речовини під час спалювання різних видів палива, в тому числі під час їх одночасного спільного спалювання:

$$E_j = \sum_i E_{ji} = 10^{-6} \sum_i k_{ji} \cdot B_i \cdot (Q_i^r)_i, \quad (1)$$

де  $E_{ji}$  – валовий викид  $j$ -ї забруднювальної речовини під час спалювання  $i$ -го палива за проміжок часу  $\tau$ ;

$k_{ji}$  – показник емісії  $j$ -ї забруднювальної речовини для  $i$ -го палива, г/ГДж

$B_i$  – витрата  $i$ -го палива за проміжок часу, т;

$(Q_i^r)_i$  – нижча робоча теплота згорання  $i$ -го палива, МДж/кг

**Розрахунковий метод визначення викидів діоксиду вуглецю  $CO_2$  і  $NO_x$  із ГТУ.** Діоксид вуглецю (вуглекислий газ  $CO_2$ ) відноситься до парникових газів і є основним газоподібним продуктом окислення вуглецю органічного палива. Обсяг викиду  $CO_2$  безпосередньо пов'язано із вмістом вуглецю в паливі та ступенем окислення вуглецю палива в ГТУ і приймається рівним 1.

Показник емісії діоксиду вуглецю  $k_{CO_2}$  під час спалювання органічного палива визначається за формулою:

$$k_{CO_2} = \frac{44}{12} \cdot \frac{C^r}{100} \cdot \frac{10^6}{Q_i^r} \cdot \varepsilon_c = \frac{44}{12} \cdot \frac{73,67}{100} \cdot \frac{10^6}{45,78} \cdot 0,995 = 58848 \text{ г/ГДж}, \quad (2)$$

де  $C^r$  – масовий вміст вуглецю в паливі на робочу масу, %;

$Q_i^r$  – масова нижня робоча теплота згорання палива, МДж/кг;

Теплота згорання газу щомісячно систематично публікується оператором газотранспортної системи України <https://tsoua.com/prozorisht/yakist-gazu/>.

Масовий вміст вуглецю в паливі та його теплоту згорання наведено в [9].

Під час спалювання органічного палива в ГТУ може утворюватися монооксид вуглецю, але в атмосфері він неодмінно перетвориться в діоксид вуглецю. Тому під час розрахунку показника емісії  $CO_2$  вважають, що весь вуглець палива, який згорів, перетворюється у вуглекислий газ.

За формулою (1) визначаємо валовий викид діоксиду вуглецю:

$$E_{CO_2} = 10^{-6} \cdot K_{CO_2} \cdot Q \cdot B = 10^{-6} \cdot 58748 \cdot 45,75 \cdot 289,2 = 773,3 \text{ т/рік}$$

За цією ж формулою визначаємо валовий викид оксидів азоту:

$$E_{NO_x} = 10^{-6} \cdot K_{NO_x} \cdot Q \cdot B = 10^{-6} \cdot 64,31 \cdot 47,75 \cdot 289,2 = 0,85 \text{ т/рік}$$

Співставлення результатів розрахунків викидів діоксиду вуглецю  $CO_2$ , проведеними за двома методиками, а саме: ГДК 34.02.305-2002 «Викиди забруднювальних речовин в атмосферу від енергетичних установок» Методика визначення (діюча) та «Інструкція про зміст та порядок складання звіту проведення інвентаризації викидів забруднюючих речовин на підприємствах» Наказ міністерства екології та природних ресурсів від № 108 від 04.04.2018 дали однакові результати, що ще раз підтверджує необхідність їхньої систематизації з подальшої розробки єдиної методики.

**Розрахунковий метод визначення приземної концентрації викидів діоксиду вуглецю  $CO_2$  оксидів азоту  $NO_x$  із ГТУ ГПА**

Вихідні дані:

Висота димової труби,  $H = 10 \text{ м}$ ;

Діаметр вихідного отвору,  $D = 1,4 \text{ м}$ ;

Середня швидкість викиду газоповітряної суміші,  $\omega_0 = 7 \text{ м/с}$ ;

Температура газоповітряної суміші,  $T = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

Температура навколишнього повітря,  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

Маса шкідливої речовини, що викидається в атмосферу,  $M_{CO_2} = 25 \text{ г/с}$ ;  $M_{NO_x} = 0,085 \text{ г/с}$ .

Максимальне значення приземної концентрації  $C_m$ ,  $\text{мг/м}^2$ , при викиді газоповітряної суміші із ГТУ ГПА на відстань  $X_m$ ,  $\text{м}$ , за якого вона досягається під час несприятливих метеорологічних умов, визначається як:

$$C_m = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot m \cdot n \cdot \eta}{H^2 \cdot (V_i \Delta T)^{1/3}} = \frac{160 \cdot 25 \cdot 1 \cdot 1,3 \cdot n \cdot \eta}{100 \cdot (10,8 \cdot 180)^{1/3}} = 5,38 \text{ г/м}^3 \quad (3)$$

де  $A$  – коефіцієнт, що визначає умови горизонтального й вертикального розсіювання. Для України  $A=160$ ;

$M$  – маса шкідливої речовини, що викидається в атмосферу в одиницю часу,  $\text{г/с}$ ;

$F$  – безрозмірний коефіцієнт, що враховує, швидкість осідання шкідливих речовин в атмосферному повітрі (1–2);

$m$  і  $n$  – коефіцієнти, що враховують умови виходу газоповітряної суміші через вихідний отвір ГТУ;

$\eta$  – безрозмірний коефіцієнт, що враховує вплив рельєфу місцевості на розсіювання домішок (для рівної місцевості  $\eta = 1$ );

$H$  – висота джерела викиду над рівнем землі,  $\text{м}$ ;

$V_i$  – витрата газоповітряної суміші  $\text{м}^3/\text{с}$ , визначається за формулою:

$$V_i = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \omega_0 = \frac{3,14 \cdot 1,4^2}{4} \cdot 7 = 10,8 \text{ м}^3/\text{с}$$

де  $D$  – діаметр вихідного отвору ГТУ,  $\text{м}$ ;

$\omega_0$  – середня швидкість виходу газоповітряної суміші ГТУ,  $\text{м/с}$ ;

$\Delta T$  – різниця між температурою газоповітряної суміші  $T_h$  і

температурою навколишнього повітря  $T_p$ ,

$$\Delta T = T_h - T_p = 200 - 20 = 180.$$

Для визначення коефіцієнта  $m$  потрібно розрахувати параметр  $f$ :

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1\sqrt{f} + 0,34 \cdot \sqrt[3]{f}} = \frac{1}{0,67 + 0,1\sqrt{0,38} + 0,34 \cdot \sqrt[3]{0,38}} = \frac{1}{0,67 + 0,10,62 + 0,34 \cdot 0,72} = 1,03,$$

$$\text{де } f = 10^2 \frac{\omega_0^2}{H^2 \Delta T} = 10^2 \frac{7^2 \cdot 1,4}{10^2 \cdot 180} = 0,38$$

Для визначення коефіцієнта  $n$  необхідно розрахувати параметр  $V_m$ :

$$n = 0,532 \cdot V_m^2 - 2,13 \cdot V_m + 3,13 = 0,53 \cdot 1,27^2 \cdot 2,18 \cdot 1,27 \cdot 3,23 = 1,29$$

$$\text{де } V_m = \frac{1,3 \cdot \omega_0 \cdot D}{H} = \frac{1,3 \cdot 7 \cdot 1,4}{10} = 1,27 \text{ м/с}.$$

Підставляючи дані у формулу (3), можна визначити приземні концентрації  $C_m$  при викиді газоповітряної суміші через вихідний отвір ГТУ. Розрахунок  $C_{m(NO_x)}$  оксидів азоту здійснюється аналогічно розрахунку  $C_{m(CO_2)}$

$$C_{m(\text{NOx})} = \frac{160 \cdot 0,027 \cdot 1 \cdot 1,3 \cdot 1,29 \cdot 1}{100(10,8 \cdot 180)^{1/3}} = 0,018 \text{ г/м}^3 = 18 \text{ мг/м}^3$$

Далі визначається величина  $X_m$  (відстань до місця, де очікується максимальна концентрація, м):

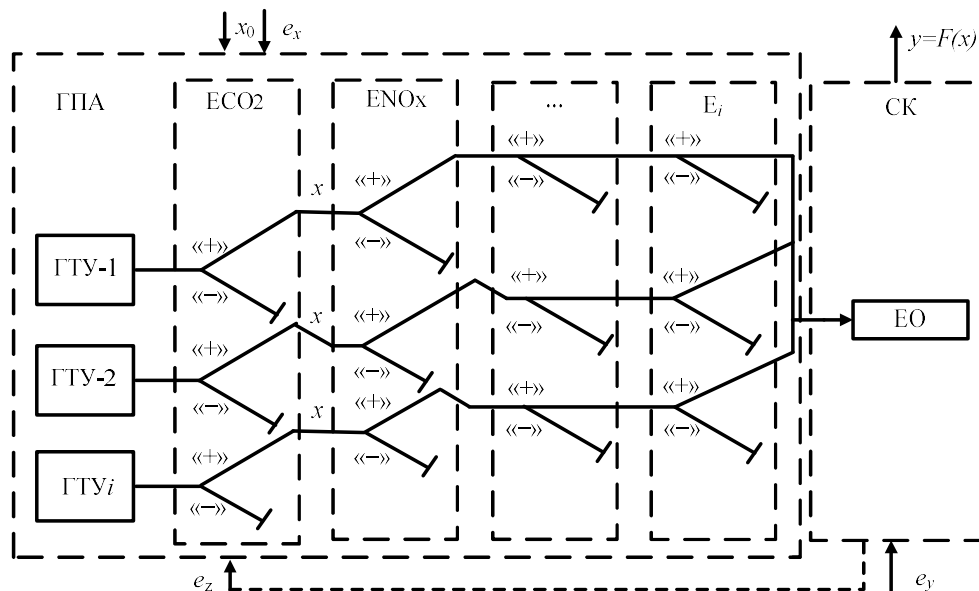
$$X_m = \frac{5 - F}{4} \cdot d \cdot H = \frac{5 - 1}{4} \cdot 10,6 \cdot 10 = 106 \text{ м}$$

де  $F$  – безрозмірний коефіцієнт, що враховує швидкість, осідання забруднення в атмосфері повітря  $F = 1$ ; безрозмірний коефіцієнт  $d = 4,95 V_m (1 + 0,28 f^{1/3}) = 4,95 \cdot 1,27 (1 + 11,8) = 10,6 \text{ м}$ .

У формулі (3) в прихованій формі входить швидкість вітру, яка впливає на розсіювання домішок. Чим більша швидкість вітру, тим більша турбулентність атмосфери й тим інтенсивніше поширюються ці домішки в навколишньому середовищі. В той же час зі збільшенням швидкості вітру зменшується висота факелу над вихідним отвором ГТУ ГПА. Небезпечна швидкість вітру не є метрологічним чинником, і може мати різні чисельні значення для кожного джерела викиду, залежно від його характеру [9].

Отже, для успішного розв'язання зазначеної екологічної проблеми необхідно першочергово провести інвентаризацію забруднювальних речовин від ГТУ ГПА шляхом методів інструментального моніторингу (вимірами) та розрахункових методик забруднення атмосферного повітря.

Для оцінювання ефективності розглянутих методик інвентаризації викидів забруднювальних речовин в атмосферу із газотурбінних установок (ГТУ) газперекачувальних агрегатів (ГПА) розглянемо схему взаємозв'язку об'єкта оцінювання ефективності з об'єктом, що обслуговується, зображену на рис. 3 [10].



$x$  та  $y$  – вихідні характеристики;  $e_x$  та  $e_y$  – перешкоди, що діють на відповідні об'єкти;  $x_0$  – задане «ідеальне» значення вихідної характеристики об'єкта оцінювання ефективності;  $e_z$  – вплив зворотних зв'язків;  $ECO_2$  – вплив викидів  $CO_2$ ;  $ENOX$  – вплив викидів  $NOx$ ;  $E_i$  –  $i$ -ий вплив викидів; ГТУ1, ГТУ2, ГТУi – відповідно ГТУ-1, -2, -іте; СК – система контролю викидів; ЕО – експлуатація обладнання; «+» – параметр контролю в допустимих межах; «-» – параметр контролю поза допустимими межами, що свідчать про несправність.

**Рис. 3 – Схема зв'язку процесу інвентаризації викидів забруднювальних речовин в атмосферу з ГТУ ГПА**

Як основу для побудови критерію функціональної ефективності використаємо функцію втрат  $L(y,t)$ , яку приймаємо рівній різниці  $\Delta y(t)$  між дійсними  $y(t)$  та ідеальними  $y_0(t)$  значеннями вихідної характеристики об'єкта, що обслуговується, у часі  $t$ . Тоді:



$$L(y, t) = \Delta y(t) = y(t) - y_0(t).$$

Так як  $y = F(x)$ , а перешкоди, що діють на об'єкт оцінювання ефективності  $e_x$  менші за ті, що діють на об'єкт, який обслуговується,  $m_y$ , доцільно виразити функцію втрат, як:

$$L(y, t) = F[x_0(t) + e_x(t) - x_0(t)]$$

де  $x_0(t)$ ,  $e_x(t)$  — ідеальна вихідна характеристика та адитивний шум об'єкта оцінювання ефективності відповідно;  $F$  — оператор перетворення вихідної характеристики об'єкта оцінювання ефективності у вихідні характеристики об'єкта, що обслуговується.

Так як вважаємо, що взаємопов'язані фактори впливу на інвентаризацію викидів забруднювальних речовин із ГТУ ГПА в допустимих межах та не змінюють їх вихідні характеристики, то задане «ідеальне» значення вихідної характеристики об'єкта оцінювання ефективності  $x_0$  це — методики інвентаризації викидів із забруднювальних речовин із ГТУ ГПА, перешкоди, що діють на об'єкт оцінювання ефективності  $e_x$  це — причини неадекватності результатів розрахунків за методиками, а вихідні характеристики системи контролю  $X$  це — параметри порівняння дотримання та порушення вимог використання методик. Прийmemo:

$$x = F(ox, px, rx, sx, ux),$$

де  $ox$  — підготовка всіх категорій персоналу;  $px$  — обрання раціональної бази коефіцієнтів;  $rx$  — обрання адекватних засобів контрольної апаратури;  $sx$  — зберігання зразків та підтримання обладнання в належному стані;  $ux$  — наявність документів системи менеджменту якості та їх дотримання.

Тоді:

$$L[F(ox, px, rx, sx, ux)] = F[x_0(t) + e_x(t) - x_0(t)].$$

Прийmemo  $x_1 = F_1(ox_1, px_1, rx_1, sx_1, ux_1)$ , де  $ox_1$  — підготовка всіх категорій персоналу, як необхідна вимога фіксації викидів у випадку використання розрахункових методів визначення викидів CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>;  $px_1$  — обрання раціональної бази коефіцієнтів у випадку використання розрахункових методів визначення викидів CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>;  $rx_1$  — обрання адекватних засобів контрольної апаратури у випадку використання розрахункових методів визначення викидів CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>;  $sx_1$  — зберігання зразків та підтримання обладнання в належному стані, як необхідна вимога методів визначення викидів CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>;  $ux_1$  — наявність документів системи менеджменту якості та їх дотримання у випадку використання розрахункових методів визначення викидів CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>;  $x_2 = F_2(ox_2, px_2, rx_2, sx_2, ux_2)$ , де  $ox_2$  — підготовка всіх категорій персоналу, як необхідна вимога фіксації викидів у випадку використання розрахункових методів визначення приземної концентрації викидів із ГТУ ГПА;  $px_2$  — обрання раціональної методики виконання завдання у випадку використання розрахункових методів визначення приземної концентрації викидів із ГТУ ГПА;  $rx_2$  — обрання адекватних засобів контрольної апаратури у випадку використання розрахункових методів визначення приземної концентрації викидів із ГТУ ГПА;  $sx_2$  — зберігання зразків та підтримання обладнання в належному стані, як необхідна вимога методів визначення приземної концентрації викидів із ГТУ ГПА;  $ux_2$  — наявність документів системи менеджменту якості та їх дотримання у випадку використання розрахункових методів визначення приземної концентрації викидів із ГТУ ГПА;  $x_3 = F_3(ox_3, px_3, rx_3, sx_3, ux_3)$ , де  $ox_3$  — підготовка всіх категорій персоналу, як необхідна вимога фіксації викидів у випадку почергового використання розрахункових методів визначення викидів CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> та розрахункових методів визначення приземної концентрації викидів із ГТУ ГПА;  $px_3$  — обрання раціональної методики виконання завдання у випадку почергового використання розрахункових методів визначення викидів CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> та розрахункових методів визначення приземної концентрації викидів із ГТУ

ГПА;  $ix_3$  — обрання адекватних засобів контрольної апаратури у випадку почергового використання розрахункових методів визначення викидів CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> та розрахункових методів визначення приземної концентрації викидів із ГТУ ГПА;  $sx_3$  — зберігання зразків та підтримання обладнання в належному стані, як необхідна вимога у випадку почергового використання розрахункових методів визначення викидів CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> та розрахункових методів визначення приземної концентрації викидів із ГТУ ГПА;  $ux_3$  — наявність документів системи менеджменту якості та їх дотримання у випадку почергового використання розрахункових методів визначення викидів CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> та розрахункових методів визначення приземної концентрації викидів із ГТУ ГПА.

Перед системою контролю забруднення повітря внаслідок експлуатації обладнання (об'єктом оцінювання ефективності) та експлуатацією ГПА (об'єктом, що обслуговується) ставимо завдання  $WE$  — забезпечення максимальної якості вихідних характеристик, тобто мінімальних втрат. Критерієм ефективності може слугувати математичне сподівання функції втрат  $M$ , тоді функціональна ефективність виражається математичним сподіванням помилки вихідної координати об'єкта, що обслуговується за час  $t$ :

$$E(t, WE) = M[L(y, t)],$$

де  $E(t, B)$  — функціональна ефективність.

Для досліджуваної системи отримуємо три вирази критерію функціональної ефективності:

$$E(t, WE)_1 = M[L(y, t)_1]_1, E(t, WE)_2 = M[L(y, t)_2]_2, E(t, WE)_3 = M[L(y, t)_3]_3, \text{ або}$$

$$E(t, WE)_1 = M_1\{F[x_0(t) + e_x(t)] - F[x_0(t)]\},$$

$$E(t, WE)_2 = M_2\{F[x_0(t) + e_x(t)] - F[x_0(t)]\},$$

$$E(t, WE)_3 = M_3\{F[x_0(t) + e_x(t)] - F[x_0(t)]\}, \text{ або}$$

$$E(t, WE)_1 = M\{L[F_1(ox_1, px_1, rx_1, sx_1, ux_1), t]\}_1,$$

$$E(t, WE)_2 = M\{L[F_2(ox_2, px_2, rx_2, sx_2, ux_2), t]\}_2,$$

$$E(t, WE)_3 = M\{L[F_3(ox_3, px_3, rx_3, sx_3, ux_3), t]\}_3,$$

де  $E(t, B)_1$  — функціональна ефективність системи контролю забруднення повітря внаслідок експлуатації обладнання у випадку використання розрахункових методів визначення викидів CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>;  $E(t, B)_2$  — функціональна ефективність системи контролю забруднення повітря внаслідок експлуатації обладнання у випадку використання розрахункових методів визначення приземної концентрації викидів із ГТУ ГПА;  $E(t, B)_3$  — функціональна ефективність системи контролю забруднення повітря внаслідок експлуатації обладнання у випадку почергового використання розрахункових методів визначення викидів CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> та розрахункових методів визначення приземної концентрації викидів із ГТУ ГПА.

Величинами  $ox$ ,  $px$  та  $sx$  можна знехтувати через їх обов'язковість. Аналізуючи інші параметри отримуємо нерівності:

$$E(t, WE)_1 = M\{L[F_1(rx_1), t]\}_1 < E(t, B)_2 = M\{L[F_2(rx_2), t]\}_2,$$

$$E(t, WE)_1 = M\{L[F_1(rx_1), t]\}_1 < E(t, WE)_3 = M\{L[F_3(rx_3), t]\}_3,$$

$$E(t, WE)_1 = M\{L[F_1(ux_1), t]\}_1 < E(t, WE)_2 = M\{L[F_2(ux_2), t]\}_2,$$

$$E(t, WE)_1 = M\{L[F_1(ux_1), t]\}_1 < E(t, WE)_3 = M\{L[F_3(ux_3), t]\}_3.$$

Вводимо додатковий параметр —  $pz$  — умовний вплив ефекту економії матеріальних ресурсів від автоматизації розрахунків у програмних комплексах, наближених до ідеальних умов зменшення впливу людського фактору. Роблячи аналогічні перетворення та припущення, отримуємо:

$$E(t, WE)_1 = M\{L[F_1(pz_1), t]\}_1 < E(t, WE)_2 = M\{L[F_2(pz_2), t]\}_2,$$

$$E(t, WE)_2 = M\{L[F_2(pz_2), t]\}_2 < E(t, WE)_3 = M\{L[F_3(pz_3), t]\}_3.$$

Так як, значення параметрів  $ix$ ,  $ux$  вихідних характеристик двох критеріїв функціональної ефективності досліджуваної системи входять в межі «ідеального», за додатковим параметром  $pz$  визначаємо, що запропонована системи контролю забруднення атмосферного повітря внаслідок експлуатації об'єкта ГТУ у випадку почергового використання розрахункових методів визначення викидів CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> та розрахункових методик визначення приземної концентрації викидів із ГТУ за інших однакових умов, яким відповідають висунуті вище припущення, підвищує ефективність експлуатації об'єкта, що обслуговується.

**Висновки.** Інвентаризація – є першим етапом у стратегії регулювання якості атмосферного повітря, оскільки забезпечує отримання інформації для розробки, обґрунтування та прийняття рішення в напрямку регламентації діяльності ГТУ із зниження несприятливого впливу на довкілля та здоров'я населення.

У зв'язку із продовженням застосування застарілих типів ГТУ ГПА, інвентаризація викидів забруднювальних речовин із них є актуальним завданням загальної проблеми надмірного забруднення шкідливими речовинами навколишнього середовища.

Не існує єдиної інтерпретації методики використання інвентаризації викидів забруднювальних речовин – важливого етапу загальної проблеми негативного впливу їх на навколишнє середовище.

Вивчені основні характеристики міри забруднення атмосферного повітря: максимально разова і середньодобова ГДК для порівняння вимірюваного (розрахункового) показника з рекомендованим стандартом.

Співставлення результатів розрахунків викидів діоксиду вуглецю CO<sub>2</sub>, проведеними за двома методиками, а саме: ГДК 34.02.305-2002 «Викиди забруднювальних речовин в атмосферу від енергетичних установок» Методика визначення (діюча) та «Інструкція про зміст та порядок складання звіту проведення інвентаризації викидів забруднюючих речовин на підприємствах» Наказ міністерства екології та природних ресурсів від № 108 від 04.04.2018 дали однакові результати, що ще раз підтверджує необхідність їхньої систематизації з подальшої розробки єдиної методики.

Розрахунковим методом визначення приземної концентрації викидів діоксиду вуглецю CO<sub>2</sub> та оксидів азоту NO<sub>x</sub> із ГТУ ГПА отримана відстань у 106 м, де очікується максимальна концентрація забруднень під час несприятливих метеорологічних умов.

Запропонована система контролю забруднення атмосферного повітря внаслідок експлуатації об'єкта ГТУ у випадку почергового використання розрахункових методів визначення викидів CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> та розрахункових методик визначення приземної концентрації викидів із ГТУ за інших однакових умов, яким відповідають висунуті вище припущення, підвищує ефективність експлуатації об'єкта, що обслуговується.

За результатами опрацьованого існуючого методичного забезпечення інвентаризації викидів забруднювальних речовин із ГТУ ГПА запропоновано розроблення єдиної методики.

**Перспективи подальших досліджень.** У подальшому планується розроблення екологічних програм зі зниження викидів забруднення в атмосферу та документів, у яких обґрунтовуються обсяги викидів.

#### **Список використаної літератури**

1. Про затвердження змін до інструкції про зміст та порядок складання звіту проведення інвентаризації викидів забруднюючих речовин на підприємствах: наказ Міністерства екології та природних ресурсів від 04.04.2018 №108.
2. Технологічні процеси з паливно-мастильними матеріалами: підручник / С.О. Пузік та інші, Київ: НАУ, 2002. 256 с.
3. Запорожець О., Пузік С. Карпенко С., Синило К., Вареник А. Інвентаризація викидів забруднювальних речовин із резервуарів складів пально-мастильних матеріалів. Проблеми тертя та зношування. 2017. 22 лист. №4(77). С. 100–106.
4. Mazaheri M., Johnson O.R., Morawska L. An inventory of particle and gaseous emissions from large aircraft thrust engine operations at an airport / Atmospheric Environment. Vol. 45, Issue 20, June 2011. P. 3500–3507.
5. Alper Unal, Airport related emissions and impacts on air quality: Application to the Atlanta International Airport / Unal Alper, YongtaoHuMichael, E. Chang, M. Talat Odman, Armistead G. Russell // Atmospheric Environment. – Vol. 39, Issue 32, October 2005. P. 5787–5798.
6. Roy A.A., Adams P.J., Robinson A.L. Air pollutant emissions from the development, production and processing of Marcellins Shale natural gas. – Journal of The Air Waste. 2014.
7. Викиди забруднювальних речовин в атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення. Київ.: Видавництво КВІЦ, 2002. 44 с.

8. Михайлюк Ю.Д. Підвищення рівня екологічної безпеки атмосферного повітря в районах розташування компресорних станцій: дис. канд. техн. наук: 21.06.01, Івано-Франківськ. 2016. 161 с.
9. Звіт по інвентаризації викидів забруднювальних речовин КС-Богородчани Богородчанського лінійного виробничого управління магістральних газопроводів філії УМГ «Прикарпаттрансгаз» ПАТ «Укртрансгаз» 2003. 214 с.
10. Пузік О.С. Контроль обводнення авіаційних палив за допомогою гідродинамічної кавітації: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.20. Київ, 2014. 20 с.

Надійшла до редакції 22.04.2021

---

**Zaporozhets O., Karpenko S., Puzik S., Sahaidak B.**

## **INVENTORY OF POLLUTANT EMISSIONS INTO THE ATMOSPHERE FROM GAS TURBINE INSTALLATIONS OF GAS PUMPING UNITS**

*Development of a single method for inventory of pollutant emissions from installations based on the elaboration of existing methods for calculation of air pollution is an important scientific and practical task in the field of environmental safety.*

*The main purpose of the study is to test and compare models of stationary emission sources and to assess air quality based on them.*

*In the inventory of pollutant emissions, the following materials are used: direct measurements, which are based on direct instrumental measurements, and calculated measurements or combinations thereof.*

*According to the direct measurements of NO<sub>x</sub> and CO emissions from the operation of gas turbines at the Valley compressor station with a nominal capacity of 1 to 50 MW, we found that: the actual emissions of NO and CO increase with the average load on the installation and the time of introduction into operation and date of issue and the actual values of the maximum allowable concentration of NO<sub>x</sub> (from 100.13 to 467 mg / m) and CO (from 16.08 to 444.88 mg / m) do not exceed the permissible levels of NO-500 mg / m and CO-250 mg / m according to the instructional documents.*

*Comparison of these calculation methods showed the same results, which confirms the need for their systematization with the subsequent development of a single methodology.*

*The distance of 106 m, where the maximum concentration of pollution in adverse weather conditions is expected, was obtained by the calculation method of determining the surface concentration of NO<sub>x</sub> and CO emissions from the installation.*

*To assess the effectiveness of the methods for inventory of pollutant emissions into the atmosphere from gas turbines, we have developed a scheme of relationship between the object being assessed for efficiency and the object being serviced. Particularly noteworthy are the results and analysis of direct measurements of NO<sub>x</sub> and CO emissions, as well as the developed scheme for linking the inventory process for pollutant emissions into the atmosphere from installations.*

*The actual concentration of pollutants can be estimated by measuring the background, although in this case it is impossible to exclude the influence of other neighboring and remote emission sources on the results of the air pollution assessment. Depending on the specific task, the results of computer simulation for given parameters of the external environment can also be used to assess the actual, retrospective or prospective conditions. Future conditions can be modeled only with the help of computer simulation.*

*The method of air pollutant concentration calculation for emissions of enterprises does not consider all possible features of emission sources and, in terms of passive stationary sources and cold emissions, the algorithm needs to be clarified and the justifications in the paper indicate ways to make these improvements.*

*Inventory is the first stage in the strategy of air quality regulation, as it provides information for the development, justification and decision-making in regulating the activities of gas turbines to reduce adverse effects on the environment and public health.*

**Keywords:** *atmosphere, emissions, pollution, inventory, installation*

### **References**

1. Pro zatverdzhennia zmin do instruksii pro zmist ta poriadok skladannia zvitu provedennia inventaryzatsii vykydiv zabrudniuiuchykh rehovyn na pidpriemstvakh: nakaz Ministerstva ekolohii ta pryrodnykh resursiv vid 04.04.2018 №108 [About the statement of changes to the instruction on the maintenance and the procedure for drawing up the report of carrying out inventory of emissions of polluting substances at the enterprises: the order of the Ministry of Ecology and Natural Resources from 04.04.2018 №108].
2. Tekhnolohichni protsesy z palyvno-mastylnymy materialamy: pidruchnyk [*Technological processes with fuel and lubricants: a textbook: textbook*] / S.O. Puzik and others, Kyiv: NAU, 2002. 256 p.
3. Zaporozhets O., Puzik S. Karpenko S., Synylo K., Varenyk A. Inventaryzatsiia vykydiv zabrudniuvalnykh rehovyn iz rezervuariv skladiv palno-mastylnykh materialiv. *Problemy tertia ta znoshuvannia [Inventory of pollutant emissions from fuel and lubricant storage tanks. Problems of friction and wear.]*. 2017. Nov. 22 #4(77). P. 100–106.
4. Mazaheri M., Johnson O.R., Morawska L. An inventory of particle and gaseous emissions from large aircraft thrust engine operations at an airport / *Atmospheric Environment*. – Vol. 45, Issue 20, June 2011. – P. 3500–3507.
5. Alper Unal, Airport related emissions and impacts on air quality: Application to the Atlanta International Airport / Unal Alper, YongtaoHuMichael, E. Chang, M. Talat Odman, Armistead G. Russell // *Atmospheric Environment*. – Vol. 39, Issue 32, October 2005. – P. 5787–5798.
6. Roy A.A., Adams P.J., Robinson A.L. Air pollutant emissions from the development, production and processing of Marcellins Shale natural gas. – *Journal of The Air Waste*. 2014.
7. Vykydy zabrudniuvalnykh rehovyn v atmosferu vid enerhetychnykh ustanovok. *Metodyka vyznachennia [Emissions of pollutants into the atmosphere from power plants. Method of determination]*. Kyiv: *Vydavnytstvo KVITs*, 2002. – 44 p.
8. Mykhailiuk Yu.D. Pidvyshchennia rivnia ekolohichnoi bezpeky atmosfernoho povitria v raionakh roztashuvannia kompresornykh stantsii: dys. kand. tekhn. nauk: 21.06.01 [*Increasing the level of environmental safety of atmospheric air in the areas of compressor stations*], *Ivano-Frankivsk*. 2016. 161 p.
9. Zvit po inventaryzatsii vykydiv zabrudniuvalnykh rehovyn KS-Bohorodchany Bohorodchanskoho liniinoho vyrobnychoho upravlinnia mahistralnykh hazoprovodiv filii UMH «Prykarpattransgaz» PAT «Ukrtransgaz» [Report on the inventory of emissions of pollutants CS-Bogorodchany Bohorodchany line production management of main gas pipelines of the branch UMG "Prykarpattransgaz" PJSC "Ukrtransgaz"] 2003. 214 p.
10. Puzik O.S. Kontrol obvodnennia aviatsiinykh palyv za dopomohoiu hidrodynamichnoi kavitatsii: avtoref. dys. kand. tekhn. nauk 05.22.20 [Control of aviation fuels watering with hydrodynamic cavitation assistance]. Kyiv, 2014. 20 p.