

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

КАРПЕНКО СЕРГІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

504.064:628.517.2+504.062.4:656.01:661.91 (043.3)

**НОРМАЛІЗАЦІЯ ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ ШУМУ ТА ВИКИДІВ
ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ
МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВІДІВ**

21.06.01 – екологічна безпека

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному авіаційному університеті
Міністерства освіти і науки України.

- Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор
Запорожець Олександр Іванович,
Національний авіаційний університет
провідний науковий співробітник науково-дослідної частини
- Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор,
Радовенчик Вячеслав Михайлович,
Національний технічний університет України "Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського",
професор кафедри екології та технології рослинних полімерів
- кандидат технічних наук, доцент
Цюман Микола Павлович,
Національний транспортний університет,
Доцент кафедри двигунів і теплотехніки

Захист відбудеться «28» вересня 2021 р. об 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.09 у Національному авіаційному університеті України за адресою: 03058, м. Київ, проспект Космонавта Комарова, 1, корпус 5, аудиторія 611.

З дисертацією можна ознайомитись у Науково-технічній бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, проспект Любомира Гузара, 1 і на сайті: www.nau.edu.ua.

Автореферат розісланий «27» серпня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 26.062.09
к.т.н., доцент Л.М. Черняк



ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Якість повітря навколо об'єктів здійснення нафтогазових операцій видобутку й транспортування є недостатньо вивченою проблемою охорони довкілля з таких причин: увага приділялась більшою мірою тільки до загроз втрати якості поверхневих та підземних вод; недостатнє розуміння внеску у якість повітря певних процесів видобутку певних процесів видобутку і подальшого транспортування нафти та газу протягом усього життєвого циклу виробничої свердловини; наявність обмеженої державної мережі моніторингу якості повітря, що не охоплює всі значущі джерела та чинники впливу на довкілля; існування значної мінливості викидів забруднюючих речовин (ЗР) в атмосферу та їхньої концентрації в повітрі, існуючі дослідження якості повітря припускають існування несприятливих наслідків для мешканців поблизу інфраструктури видобутку й транспортування нафти та газу.

За результатами досліджень вітчизняних і зарубіжних авторів, викиди летких сполук, включаючи небезпечні ЗР 1-4 класу небезпеки (понад 20 найменувань, серед них 4 групи речовин з ефектом сумації шкідливого впливу на людину), а також рівні звуку від процесів компримування газу на компресорних станціях (КС), можуть перевищувати національні нормативи стану атмосферного повітря та викликати занепокоєння населення, що мешкає в околиці газотранспортних магістралей.

Найбільший негативний вплив на навколишнє середовище справляють викиди природного газу та продукти його згорання та/або інших видів палив на КС. На частку викидів продуктів згорання палива в газотурбінних установках (ГТУ) газоперекачувальних агрегатів (ГПА) припадає понад 90% всіх валових викидів в атмосферу від стаціонарних джерел КС.

У умовах експлуатації ГПА, які розташовані на відкритій місцевості, де поверхня ґрунту є основним джерелом природного пилу, відбувається постійне осадження забруднень на поверхнях лопаток ротора та направляючих апаратах компресора ГТУ. Це зумовлює зниження його ефективної потужності та коефіцієнта корисної дії, і, як наслідок, призводить до зайвих витрат паливного газу, які можуть становити до 3% від оптимальних значень та збільшення емісії ЗР в атмосферу. Для підтримання потужності ГТУ в оптимальних технічних межах поверхні лопаток ротора та направляючих апаратів компресора періодично очищують за допомогою водних розчинів технічних мийних засобів або твердих органічних часток. За результатами виробничих іспитів миття компресорів ГТУ водними розчинами площа промивання поверхні лопаток становить не більше 40–50% їхньої загальної площі. А у разі застосування способу очищення за рахунок інтенсивного руйнування твердих органічних часток при їхньому зіткненні з поверхнею рухомих деталей ГТУ утворюється дрібнодисперсний пил (розміром часток 0,5...5,0 мкм), яка осідає на покритих масляною плівкою поверхнях деталей ГТУ і зумовлює їх забруднення. Тому, існуючі способи миття лопаток компресора є недостатньо ефективними.

Встановлення границі санітарно-захисної зони (СЗЗ) на межі охоронної зони КС не завжди є обґрунтованим, особливо в частині контролю несприятливого впливу шуму КС. Рівні звуку понад 45 дБА (норматив ДСП-173-96 для нічного періоду доби) спостерігаються за межами охоронної зони КС (на відстані 700 м від огорожі) і на сьогодні контроль за цим параметром не здійснюється. Застосування нормативної настанови з розрахунку рівнів шуму в приміщеннях і на територіях

(ДСТУ-Н Б В.1.1-35:2013) стосовно джерел шуму КС потребує уточнення, в першу чергу з причини специфіки експлуатації і випромінювання шуму основними акустичними джерелами ГПА та іншого обладнання КС.

У зв'язку з цим удосконалення наявних, створення нових, екологічно безпечних технологічних процесів експлуатації ГПА компресорних станцій газотранспортних магістралей, що забезпечують додержання нормативів впливу шкідливих чинників на довкілля, є актуальним науково-практичним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана згідно з планами науково-дослідних робіт Національного авіаційного університету за темами: «Створення нової технології одержання палива з біомаси на основі опалого листя» (№ Д/Р 0107U002667, 2007 – 2009 рр.); «Розроблення засобів еколого-економічної оптимізації багатокритеріальної оцінки збалансованого розвитку авіаційної діяльності в Україні» (2015–2017 рр., № Д/Р 0115U002463); «Розробка ГІС-платформи удосконалених моделей обчислення чинників впливу авіації на довкілля для моніторингу, зонування та оптимізації діяльності аеропортів» (№ Д/Р0118U003368, 2018–2019 рр.); «Розроблення комплексу моделей багатокритеріальної еколого-економічної оцінки і оптимізації чинників впливу на довкілля авіаційних підприємств в Україні» ((№ Д/Р 0120U102030, 2020–2022 рр.).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності засобів та заходів нормалізації стану довкілля в умовах випромінювання шуму та викидів забруднюючих речовин компресорних станцій магістральних газопроводів.

Основні завдання дослідження:

- дослідити чинники та джерела фізичного і хімічного забруднення атмосферного повітря компресорних станцій магістральних газопроводів;
- удосконалити методи очищення лопаток ротора та направляючих апаратів компресора ГТУ від забруднень за допомогою екологічно чистих матеріалів;
- дослідити умови викиду ЗР від шахт випуску відпрацьованих газів ГТУ та їхнього розповсюдження в атмосферному повітрі з метою удосконалення моделі й методики обчислення концентрацій ЗР за межами компресорних станцій;
- дослідити поширення звуку від акустичних джерел ГПА в неоднорідних атмосферних та топографічних умовах розміщення та експлуатації КС з метою удосконалення моделі й методики обчислення рівнів звуку за межами компресорних станцій магістральних газопроводів.
- визначити шляхи утилізації відпрацьованих мастил газотурбінних установок КС.

Об'єкт дослідження – процеси фізичного і хімічного забруднення атмосферного повітря від джерел впливу компресорних станцій магістральних газопроводів.

Предмет дослідження – рівні звуку та звукового тиску шуму і концентрації забруднення атмосферного повітря від компресорних станцій магістральних газопроводів, закономірності їхнього поширення.

Методи дослідження: методи вимірювання акустичних характеристик провідних джерел шуму компресорних станцій; методи статистичної обробки результатів вимірювання та обчислення рівнів звуку та звукового тиску; методи аналізу рішень рівняння поширення звукових хвиль в умовах рефракції в

неоднорідній атмосфері та відбиття звукових променів від обмежуючих поверхонь; методи аналізу максимуму утворення концентрації від стаціонарного джерела викиду забруднюючих речовин; методи очищення поверхні від забруднення.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукову новизну визначають такі теоретичні та експериментальні результати досліджень:

уперше:

- теоретично обґрунтовано та експериментально доведено можливість застосування полідисперсних гранул аморфного льоду для очищення поверхні лопаток осьових компресорів ГТУ від забруднень під час їхнього технічного обслуговування та ремонту;

- розроблено модель обчислення рівнів звуку (рівнів звукового тиску) для шуму від джерел компресорних станцій магістральних газопроводів в умовах реальної неоднорідної атмосфери з урахуванням рефракції звукових променів під час поширення в оточуючому повітрі та реальної місцевості з урахуванням відбиття звукових променів від земної поверхні;

удосконалено модель обчислення концентрацій забруднення повітря викидами стаціонарних джерел компресорних станцій шляхом уточнення ефективної висоти джерел викиду за відсутності вертикальної складової швидкості об'єму газів, що витікає з гирла джерела, та спливання газів за рахунок термогравітаційної конвекції у наслідок різниці температур між об'ємом газів, що витікає, та навколишнього повітря;

подальшого розвитку набуло вдосконалення перспективних зразків палива з композицій опалого листя з вугіллям, горючим сланцем і відходами нафтопродуктів, що відпрацювали на ГТУ компресорних станцій магістральних газопроводів.

Практичне значення одержаних результатів. Доведена можливість очищення із застосуванням гранул аморфного льоду поверхні лопаток осьових компресорів ГТУ від забруднень під час їхнього технічного обслуговування та ремонту, створені пристрої для отримання льодових гранул та установка для їхнього застосування з метою очищення лопаток осьових компресорів. Розроблено зразки палива із композицій опалого листя з відходами нафтопродуктів, що дозволило провадити утилізацію відпрацьованих мастил на ГТУ ГПА КС та опалого листя.

Розроблена методика обчислення рівнів звуку (рівнів звукового тиску) для шуму джерел компресорних станцій магістральних газопроводів в умовах неоднорідної (реальної) атмосфери з урахуванням рефракції звукових променів при поширенні в оточуючому повітрі та реальної топографії з урахуванням відбиття звукових променів від земної поверхні, що дозволяє обґрунтовувати радіус СЗЗ навколо КС і забезпечення виконання нормативів шуму довкілля на сельбищних територіях, що їх оточують.

Удосконалена методика обчислення концентрацій забруднення повітря викидами стаціонарних джерел компресорних станцій шляхом уточнення ефективної висоти джерел викиду газів, що витікають з гирла шахти ГПА, що дозволяє з більшою точністю обчислювати концентрації ЗР в атмосферному повітрі та обґрунтовувати радіус СЗЗ навколо КС і виконання нормативів хімічного забруднення повітря на сельбищних територіях.

Результати дисертаційних досліджень реалізовані на ДП «ЗАВОД 410 ЦА» та ТОВ ПФК «Технополюс» та підтверджені актами упровадження.

Особистий внесок здобувача. Дисертантом самостійно проведено підбір та аналіз літератури, одержано експериментальні дані, виконано їх обробку та формулювання висновків. Постановка задачі досліджень та обговорення результатів проводилися спільно з науковим керівником, проф., д.т.н. О.І. Запорожцем.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та наукові результати дисертаційної роботи були представлені та обговорені на наукових конференціях: МНТК «Безпека життєдіяльності людини – освіта, наука, практика» (Київ, 2005 р.); I і II МНТК «Проблеми хімотології» (м. Київ, 2006 р.; 2008 р.); XIV Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів (м. Київ, 2020 р.); Aviation in the XXI-st Century. Safety in Aviation and Space Technologies: The Xth World Congress (м. Київ, 2020 р.); International Symposium on Electric Aviation and Autonomous Systems 2020–ISEAS–2020, International Symposium On Aircraft Technology, MRO & Operations– ISATECH–2020, (Kyiv, Ukraine, 2020); XIII МНТК «Проблеми хімотології» (м. Кам'янець-Подільський, Україна, 2021 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 20 наукових праць, у тому числі 8 статей, з яких 8 статей у наукових фахових виданнях (з них 5 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз, в тому числі 1 –Scopus), 8 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій, 4 патенти України.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, а також висновків та переліку літературних джерел. Матеріали дисертаційної роботи викладено на 232 сторінках друкованого тексту, що містить 28 таблиць, 74 рисунка, бібліографію із 164 посилань та 4 додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми проведених досліджень, показано зв'язок роботи з науковими темами, сформульовано мету і задачі дослідження, наукову новизну та практичну цінність роботи, вказано особистий внесок здобувача.

У першому розділі проведено аналітичний огляд наукової літератури, існуючих методів та технологій очищення компресорів ГТУ від забруднень і звітів з оцінки впливу на довкілля проектів будівництва та реконструкції компресорних станцій магістральних газопроводів. Проаналізовано джерела та чинники впливу на довкілля КС магістральних газопроводів. За видами економічної діяльності в Україні у 2020 році лідерами серед найбільших забруднювачів атмосферного повітря викидами ЗР і парникових газів від стаціонарних джерел були підприємства постачання електроенергії, газу, пари та кондиційованого повітря – загалом 849232 тон забруднень. Встановлено, що під час транспортування газу КС є найбільш істотними джерелами забруднення атмосфери.

Вплив КС магістральних газопроводів на довкілля досліджено і наведено у роботах О.М. Адаменка, К.С. Борисенка, В.Я. Грудза, Р.М. Говдяка, П.В. Куцина, Г.Є. Панова, А.П. Шицькової, Л.С. Новікова, А.Л. Терехова, Г.М. Любчика, А.І. Гриценка, Б.І. Шелковського, А.Д. Седих, Е.Д. Виноградова, І.М. Карпа, Я.М. Семчука та ін. У роботах вітчизняних та іноземних вчених всебічно доведено, що до основних чинників впливу магістрального газопроводу на навколишнє середовище можна віднести: хімічне забруднення атмосфери, а також поверхневих і підземних вод; фізичний вплив об'єктів газопроводу (шумове, світлове, електромагнітне та вібраційне випромінювання); утворення відходів (в тому числі з радіологічними

матеріалами) при різних видобувних, експлуатаційних та ремонтних роботах на об'єктах газопроводу. Основними організованими джерелами викидів ЗР при роботі ГПА є вихлопні труби (шахти), через які в атмосферу надходять продукти згоряння природного газу, що спалюється в камері згоряння ГТУ. Серед них переважають оксиди азоту, зважені частки різної дисперсності, оксид вуглецю і бенз(а)пірен, а також природний газ (основний компонент – метан).

Домінуючими постійними джерелами шуму на КС є ГПА і апарати повітряного охолодження газу. Шум технологічного обладнання КС має високі рівні звуку (РЗ) і досягає 128 дБА у безпосередній близькості від джерела шуму (1 м від звукоактивної поверхні), до 95 дБА у виробничих приміщеннях і понад 90 дБА на території КС. Виміряні значення РЗ в середині житлових будинків і на території їхнього розташування на різних відстанях до КС вказують, що за межами їх охоронної зони (700 м від огорожі КС) можливе перевищення нормативних значень ДСП планування та забудови населених пунктів № 173 (наказ МОЗУ від 19.06.96).

В Україні відсутні галузеві методичні документи обчислення рівнів звуку і концентрацій ЗР в атмосферному повітрі, що утворюються в результаті роботи стаціонарних джерел на території КС і населених пунктів (за межами охоронної зони КС), що обмежує об'єктивне встановлення СЗЗ навколо КС магістральних газопроводів. Встановлення границі СЗЗ на межі охоронної зони не завжди є обґрунтованим, зокрема в частині контролю впливу шуму КС на населення.

У другому розділі наведені результати дослідження експлуатаційного забруднення і процесів очищення від забруднень лопаток осьового компресора (ОК) ГТУ. Досвід експлуатації ГТУ різних типів показує, що помітне зниження робочих параметрів ОК через забруднення лопаток, відбувається приблизно через 1500–2000 год. роботи. Перевищення емісії NO_x , наприклад, для ГТУ потужністю 10 МВт (під час роботи із забрудненим компресором) відносно граничного нормованого рівня емісії NO_x для даного типу ГТУ в 100 мг/м^3 , на 20-30%, або до 260 тон за 6000 год. роботи перевищує на 52 т викиди порівняно з нормативним значенням емісії.

Визначено склад мінерального атмосферного пилу, твердість деяких його компонентів, гранулометричні характеристики пилу (для регіонів Київщини, Одещини, Приазов'я). Відкладення на лопатках ОК на 25-85 % складаються з органічних сполук і 30 % з яких є ефірні мастила, що застосовуються при експлуатації ГТУ. Мінеральні забруднення містять переважно оксиди і солі Al, Fe, Ca, Pb та інші тяжкі метали. Твердість деяких забруднень значно перевищує твердість матеріалів для виготовлення лопаток компресорів ГТУ. Відкладення на лопатках збільшують шорсткість поверхонь, змінюючи їхню аеродинамічну форму, і відповідно погіршують характеристики компресора: зменшується тиск за ОК, збільшується потужність, що ним споживається, падає ККД, межа помпажа компресора зміщується у бік його робочої зони. Забруднення проточної частини ОК може привести до зменшення його витрати повітря до 6% і ККД на 2-3%, що викликає зниження корисної потужності ГТУ до 10% і загального ККД до 2-5%.

Збільшення витрат паливного газу за оптимальних експлуатаційних умов свідчить про забруднення ОК, яке викликає необхідність здійснення технологічної операції очищення деталей ОК від експлуатаційних забруднень. Існуючі системи промивання ОК не у повній мірі враховують фізичну сторону процесу забруднення

його проточної частини: розподіл забруднення за ступенями ротора, характер відкладень (розчинні, нерозчинні водою або їх суміш), особливості наростання відкладень протягом часу експлуатації, тощо. Режими промивання, які застосовуються, під час роботи ОК і при холодному прокручуванні, як правило, далекі від оптимальних і виконуються однією й тією ж системою форсунок, встановлених у тракті всмоктування повітря або патрубку ОК, або безпосередньо перед вхідним конфузуром ОК.

У роботі досліджена можливість застосування для очищення поверхонь лопаток ротора та направляючого апарату ОК кристалічного і аморфного льоду, який може існувати за різними тиску та температури доквілля. На їхній основі запропонована нова ефективна технологія для очищення проточної частини ОК газотурбінних установок на газоперекачувальних станціях. У ході проведення експерименту були отримані гранули низькотемпературного льоду аморфної структури з різним геометричним розміром (рис. 1а) за допомогою холодоагенту – рідкого азоту. Використання полідисперсного складу гранул повинно підвищити ефективність очищення ротора ОК. На рис. 1б показаний пристрій для отримання гранул льоду полідисперсного складу розміром від 2 до 5 мм.

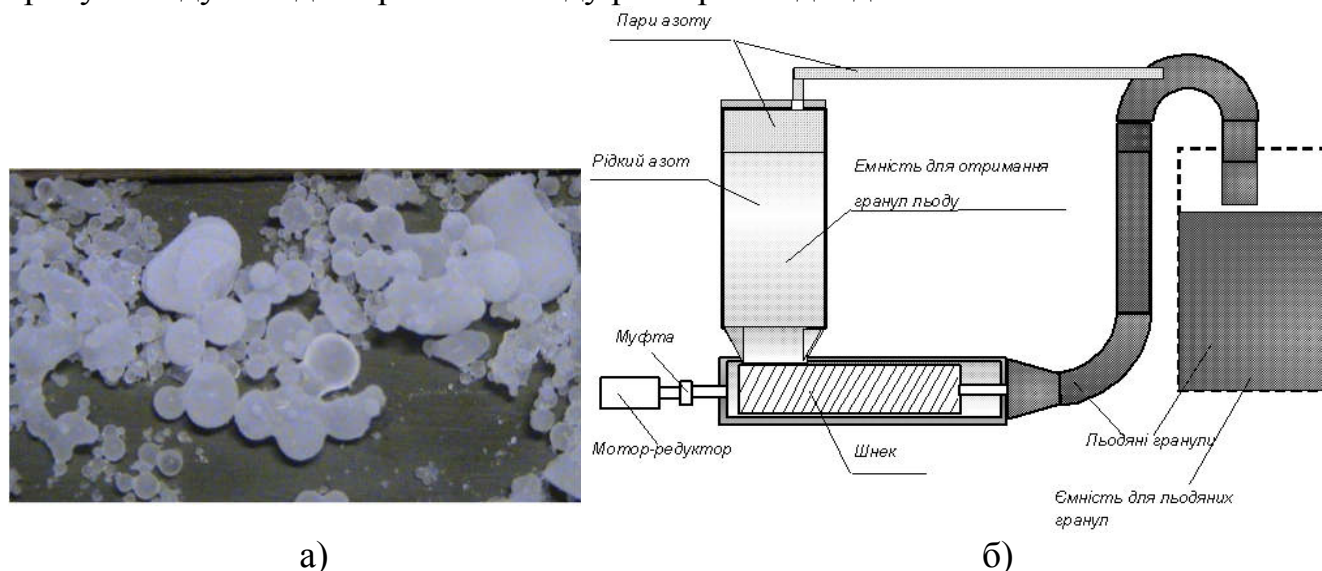


Рис.1. Полідисперсний склад гранул льоду (а) та пристрій (б) для їхнього отримання

Введення крижаних гранул для очищення ОК здійснюється у процесі роботи ГТУ за допомогою спеціального пристрою, яке здійснює рівномірну подачу гранул по всьому контуру компресора. Час очищення однієї ГТУ – 3 год. Час на роботи з підготовки однієї установки для очищення ОК ГТУ – 1 год. Результати застосування технології очищення поверхонь крижаними гранулами показали, що продуктивність та ефективність її очищення перевищує технологію із застосуванням кісточкової крихти. В тому числі, при використанні крижаних гранул, на відміну від існуючих технологій очищення поверхонь, відсутній пил, який осідає на поверхнях ОК ГТУ.

Одним із пріоритетних напрямів розвитку паливної бази України є впровадження енергозберігаючих технологій та альтернативних джерел енергії й, зокрема, палива на основі біомаси. Розроблено зразки палива із композицій опалого листя з вугіллям, горючим сланцем і відходами нафтопродуктів, що дозволило провадити утилізацію

відпрацьованих мастил на ГТУ ГПА КС та опалого листя. Експериментально визначено фізико-хімічні і екологічні властивості нових паливних брикетів. Визначено, що зразки палива під час згорання мають задовільну середню зольність у межах 9...11% та показники викидів ЗР, що не становлять загрози довкіллю. Визначено основні технічні та фізико-хімічні вимоги до опалого листя і наповнювачів під час його використання як сировини для виготовлення паливних брикетів.

Третій розділ присвячений експериментальним вимірюванням рівнів звуку для шуму джерел КС в натурних умовах в м. Золотоноша. Вимірювання рівнів звуку (РЗ) та звукового тиску (РЗТ) виконані в точках, що розташовані на території та поза територією КС. Під час акустичних вимірювань на КС в роботі знаходився тільки один ГПА ГТН-25И, що дало змогу виконати вимірювання з виокремленням основних джерел шуму ГПА: шахти випуску відпрацьованих газів, шахти всмоктування повітря в ГТУ, технологічної обв'язки ГПА. Вимірювання виконувались у сприятливих погодних умовах: температура повітря 23-24°C, тиск 752 мм.рт.ст., вологість повітря 70-80%, вітер 1 м/с – близько до умов штилю. Тобто, за таких показників вплив метеорологічних умов на результати вимірювання РЗ та РЗТ шуму акустичних джерел ГПА можна вважати мінімальним.

Рівні звуку вимірювались наступні: L_{Apeak} , L_{AE} , L_{AFmax} , L_{AFmin} і L_{Aeq} , всі з частотною характеристикою «А» та часовою характеристикою «F», для проміжних часових інтервалів 1 с. РЗТ вимірювались такі: сумарний РЗТ, спектральні в октавних та третино-октавних смугах частот в діапазоні 20 Гц – 20кГц. Запис акустичного шуму (рис. 2) в кожній точці дозволив виконати більш детальний акустичний аналіз в лабораторних умовах.

РЗ та РЗТ шуму ГТУ всередині укриття ГПА-25И, їхні основні величини визначено та наведено в табл. 1 і на рис. 2., зміни РЗ і РЗТ знаходяться у межах 5 дБ. Відповідно до вимог стандартів та правил шум ГТУ слід вважати стаціонарним.

Таблиця 1 - РЗ та РЗТ шуму (дБА) ГТУ всередині укриття ГПА-25И

Виміряна величина	L_{Apeak}	L_{AE}	L_{AFmax}	L_{AFmin}	L_{Aeq}
Середнє	109,80	97,71	98,39	97,011	97,71
Максимум	111,83	98,61	99,5	97,8	98,61
Мінімум	108,22	96,65	97,22	95,94	96,65
Стандартне відхилення	0,60	0,35	0,40	0,34	0,35

Характер спектру шуму ГТУ ззовні (рис. 3, спектр $Avr1$) укриття ГПА-25И відповідає основним спектральним характеристикам шуму турбокомпресора всередині укриття (рис. 3, спектр $Avr2$) – наявні вузькосмугові складові випромінювання шуму в межах смуг 80, 315-500 і 2500 Гц. Різниця усереднених спектрів РЗТ шуму КТУ всередині і ззовні укриття (рис. 3, спектр $Tran$) обумовлена звукоізоляційними властивостями стінок укриття. Стіни і перекриття виконані з двота тришарових панелей (типу «сендвіч», зовнішні листи сталеві товщиною до 0,5мм, всередині наповнення негорючим теплостійким матеріалом з базальтового волокна). На рис. 3 наведений спектр $TranCal$ – обчислені значення звукоізоляції для стандартної панелі за моделлю, що удосконалена в процесі виконання досліджень поширення шуму від акустичних джерел КС. У результатах вимірювання ефект

резонансу виявився ширшим за одну октаву (в смузі 6300 Гц), що зумовлено неповними характеристиками панелі і впливом інших джерел шуму на РЗТ в точці ззовні укриття. Як правило, спеціальні заходи із зниження РЗ шуму всередині укриття не передбачаються через відсутність у ньому постійних робочих місць.

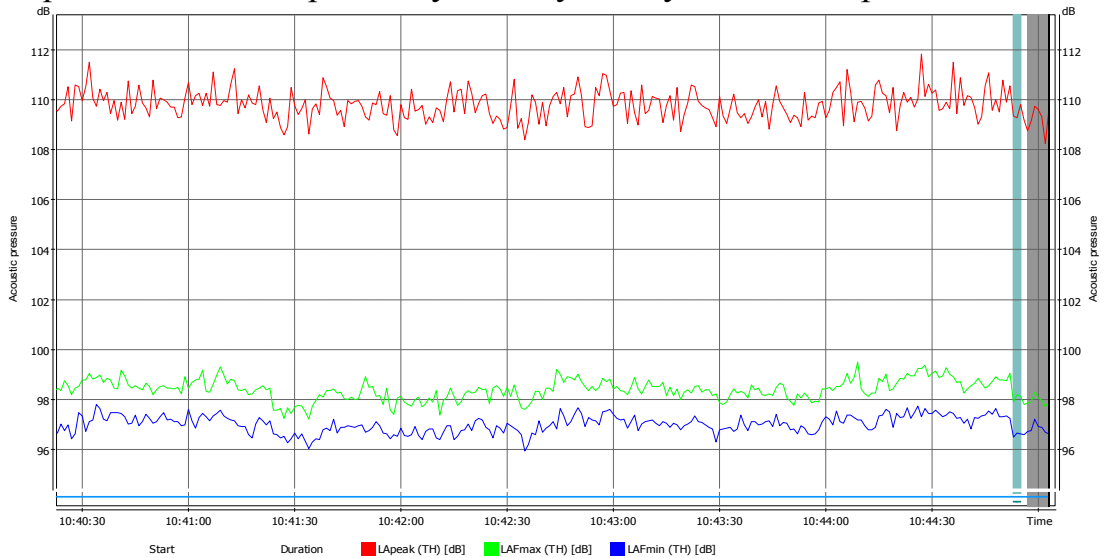


Рис. 2. РЗ шуму ГТУ всередині укриття ГПА-25И

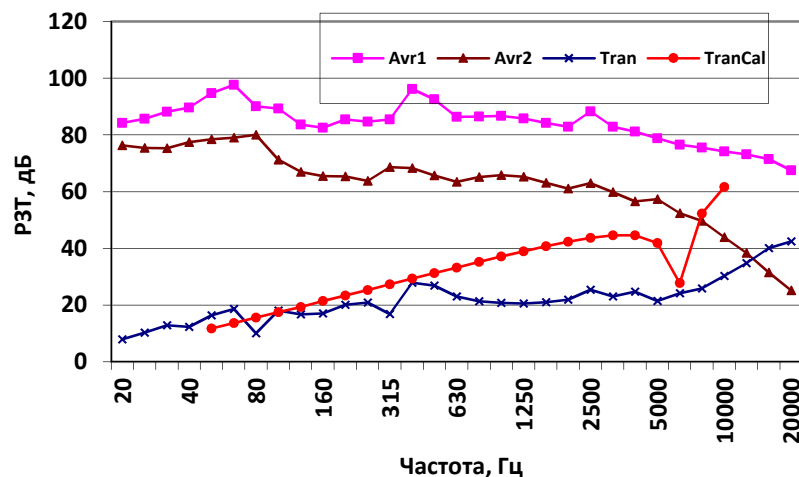


Рис. 3. Третино-октавні РЗТ шуму ГТУ всередині (Avr1) та зовні (Avr2) укриття й їх різниця (Tran– різниця усереднених спектрів РЗТ ззовні та в середині укриття, TranCal–обчислені значення звукоізоляції для стандартної панелі)

Для відокремлення шуму від шахти всмоктування повітря ГПА-25И виміряні спектри РЗТ в точках з торця укриття (спектри Avr1 і Avr1i) і біля рогу торцевої стіни укриття (спектри Avr2 і Avr2i), які подані на рис. 4: спектри відповідають масиву спектрів з РЗ, що дорівнює усередненому РЗ шуму протягом часу запису. Штриховою лінією наведені обчислені спектральні РЗТ шуму від шахти всмоктування для дистанції 1м та 3 м (спектри Spl1 і Spl3) між мікрофоном та основою шахти всмоктування повітря для спектральних рівнів звукової потужності (РЗП) даного типу ГТА, наведених в каталозі СТО ГАЗПРОМ 2-3.5-041-2005. Відмінність між виміряними та обчисленими спектрами можна пояснити, в тому числі, спектральними РЗП, наведеними в каталозі в октавних смугах частот (рис.4б),

їх розподіл в третино-октавних смугах виконаний в даній роботі із застосуванням методу інтерполяції РЗП між табличними значеннями в октавних смугах.

Спектри РЗТ шуму від шахти витоку газів ГПА-25И представлені на рис. 5: штриховими лініями наведені обчислені спектральні РЗТ шуму від шахти витоку газів ГПА-25И для дистанції 1 м та 5 м між мікрофоном та основою шахти витоку газів. Збіжність результатів вимірювання та обчислення РЗТ шуму від провідних джерел на рис. 4 і 5 задовільна. Індекс відповідності d_2 застосованої акустичної моделі до результатів вимірювання шуму від шахти всмоктування повітря та шахти витоку газів отриманий величиною 0,8-0,9, причому чим ближче d_2 до 1, тим більше модель відповідає експериментальним спостереженням.

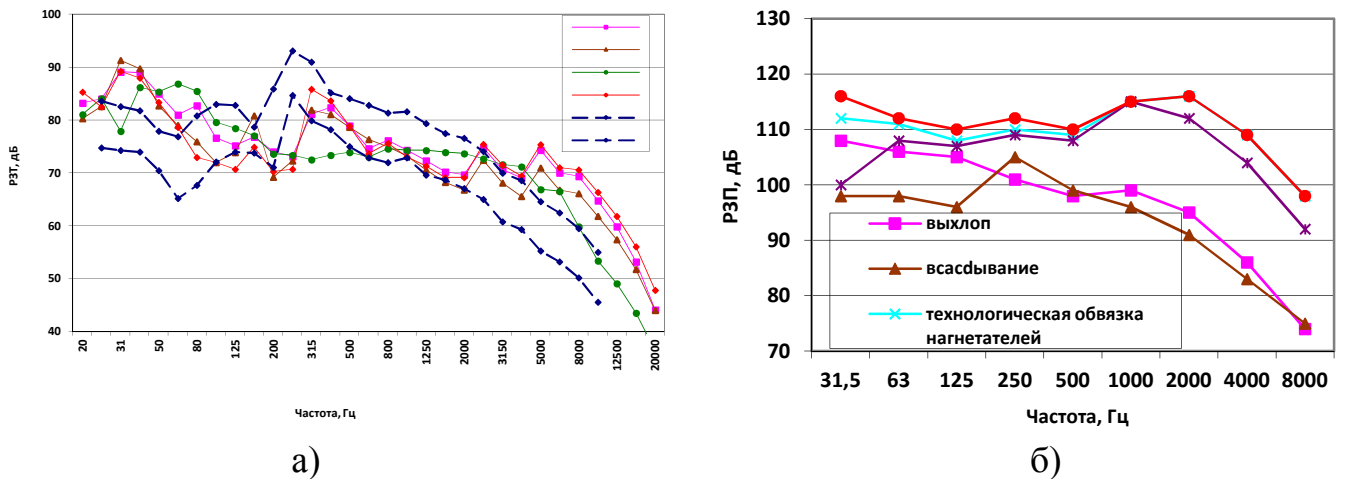


Рис. 4. Обчислені та усереднені виміряні третино-октавні РЗТ (а) і РЗП (б) шуму від шахти всмоктування повітря ГПА-25И: штриховими лініями наведені обчислені спектральні РЗТ шуму для дистанції 1 м та 3 м між мікрофоном і основою шахти

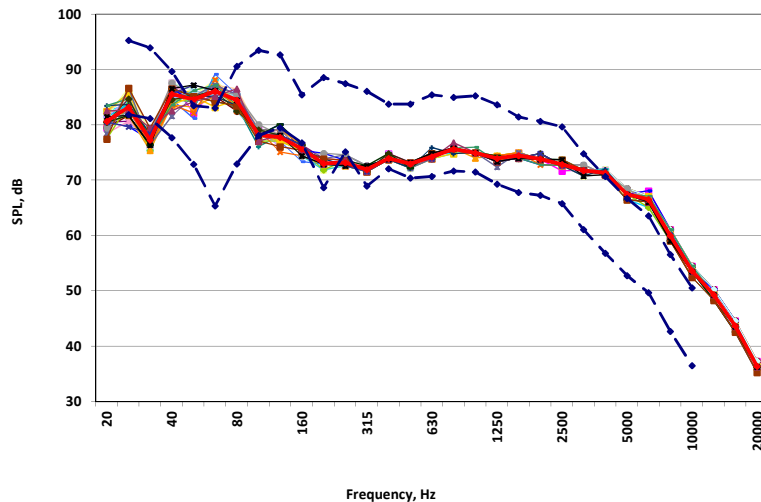


Рис. 5. Обчислені та усереднені виміряні третино-октавні РЗТ шуму від шахти витоку газів ГПА-25И: штриховими лініями наведені обчислені спектральні РЗТ шуму для дистанції 1 м та 5 м між мікрофоном та основою шахти

Рівні звуку та РЗТ шуму у довкіллі від ГПА, які утворюються роботою усіх домінуючих джерел ГПА, виконані на території КС і поза нею. Його експериментальне дослідження виконано на різних відстанях від ГПА з метою

визначення внеску ефектів розповсюдження звуку в першу чергу внеску ефекту земної поверхні, тобто інтерференції прямої та відбитої звукових хвиль у загальне акустичне поле шуму ГПА. Вид поверхні, що відбиває звукові промені, в усіх точках був різним. На рис. 6 наведено порівняння усереднених спектрів РЗТ шуму на відстані 50-480 м від шахти витоку газів ГПА-25И зі спектрами шуму акустичних джерел технологічної обв'язки нагнітача та шахти випуску газів – крім впливу ефекту поширення звукової хвилі від точкового джерела і ефекту поглинання звуку в атмосферному повітрі очевидним є вплив ефекту земної поверхні в смугах середніх та високих частот. Вплив ефекту земної поверхні також виражений у залежності РЗ від відстані (рис. 6б) – в точках контролю звуку за межами території КС (понад 125 м від джерела шуму) послаблення РЗ з відстанню відбувається з певним «зсувом» на 2-3 дБА порівняно із РЗ, виміряними на території (асфальто-бетонне покриття відбиваючої поверхні).

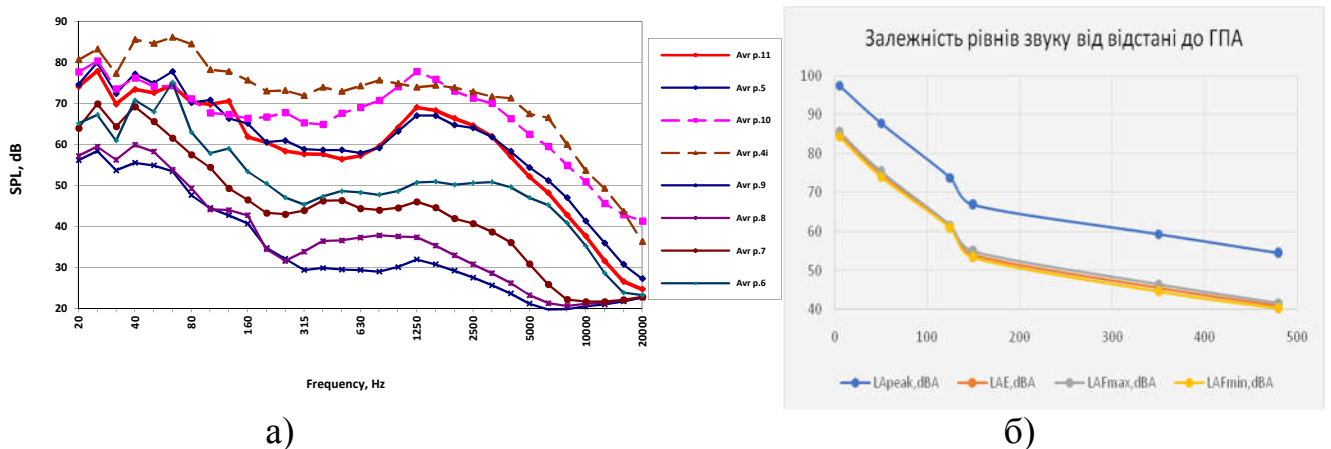


Рис. 6. Залежність спектральних РЗТ (а) та РЗ (б) від відстані до шахти витоку газів для шуму ГПА-25И: спектри Avr4i і Avr10– для шахти витоку газів (рис. 5) та для технологічної обв'язки нагнітача

Четвертий розділ присвячений обґрунтуванню обчислювальної моделі рівнів звуку джерел шуму КС і її дослідженням. Для розрахунків РЗ в окремій точці залежно від відстані до джерела шуму в обчислювальній моделі необхідно враховувати ефекти розповсюдження звукових хвиль в атмосферному повітрі та характеристики джерела шуму: направленість і спектральні характеристики випромінювання, висоту встановлення джерела над земною поверхнею; відстань від джерела до точки визначення рівня звуку; поглинання звуку в атмосферному повітрі, що залежить від частоти звуку та параметрів стану атмосфери; ефекту впливу земної поверхні (а саме, відбивання і поглинання звукової енергії поверхнею землі, що залежать від частоти звуку та параметрів стану поверхні, висоти джерела шуму, тощо); екранування звукових хвиль перешкодами на шляху їх розповсюдження; погодні ефекти (а саме, швидкість вітру, зміна швидкості вітру та температури повітря з висотою, які визначають умови рефракції звукових хвиль). Встановлено, що РЗТ $L_p(f)$ в точці контролю шуму на відстані R залежно від частоти f випромінювання у загальному випадку розраховуються за формулою:

$$L_p(f) = L_w(f) + DI - 10 \lg(4\pi R^2) - \alpha R - \Delta_{gr} - \Delta_{scr} - \Delta_{ref} - \Delta_{tl}, \quad (1)$$

де $L_W(f)$ – РЗП джерела шуму (вданому випадку – ГПА), DI – індекс спрямованості джерела випромінювання шуму; α – коефіцієнт поглинання звуку в повітрі, ΔL_{gr} – ефект впливу землі, ΔL_{scr} – ефект екранування звукових хвиль, ΔL_{ref} – ефект рефракції звукових хвиль, ΔL_{it} – ефект звукоізоляції огорожувальної будівлі (розглядається за умови розміщення джерела шуму всередині будівлі – наприклад ГТУ розміщуються в машинному залі КС).

У дисертаційній роботі досліджено методики акустичного розрахунку за галузевим стандартом РФ СТО ГАЗПРОМ 2-3.5-043-2005, міжнародної методики CONCAWE і ДСТУ-Н Б В.1.1-33:2013. Перевагою методики ГАЗПРОМ є наявність каталогу шумових характеристик газотранспортного обладнання (СТО ГАЗПРОМ 2-3.5-041-2005), в якому РЗП в октавних смугах частот та коригований за шкалою «А» РЗ досліджено і наведено для більшості ГПА, що сьогодні експлуатуються, в тому числі на КС газотранспортної магістралі України. Встановлено, що алгоритми акустичного розрахунку ДСТУ є найбільш простими, їх застосування навіть не виявляє залежності РЗ в точці вимірювання від висоти джерела шуму, а за методикою ГАЗПРОМ для відстаней, які порівнюються з радіусами охоронної зони від КС різного класу (відстань 300-700 м від огорожі станції) наявні суттєві відмінності величиною 2-3 дБА при збільшенні висоти джерела шуму від 2-3 м (висота встановлення ГТУ та технологічної обв'язки) до 20 м (висота шахти випуску газів ГТУ, що відпрацювали).

Модель CONCAWE була створена для прогнозування РЗТ в октавних частотних смугах (63 Гц...4 кГц) та еквівалентних РЗ від нафтопереробних та нафтохімічних виробничих комплексів, яка сьогодні застосовується для оцінки ширшого кола джерел шуму довкілля. Модель рекомендується застосовувати на відстані до 2 км та для висоти джерела шуму до 25 м. Перевагою методики є включення коригування на ослаблення звуку через метеорологічні ефекти. Модель CONCAWE класифікує стан атмосфери за шістьма категоріями Пасквіла від А до G на основі комбінованого вертикального градієнта температури і швидкості звуку в повітрі над земною поверхнею. Ослаблення є функцією частоти звуку, відстані та метеорологічної категорії Пасквіла. Модель враховує вертикальний градієнт швидкості вітру опосередковано, таким чином, ефект згинання вгору звукових променів в умовах вітру не розраховується.

Порівняння результатів обчислення за моделями ДСТУ, Газпрому та CONCAWE для базової схеми обчислення РЗТ та РЗ залежно від відстані (для висоти $H_{дж}=10$ м) наведено на рис. 7. У роботі визначено, що алгоритми обчислення РЗ за стандартом ДСТУ не враховують типу поверхні, що відбиває звукові хвилі (моделі Газпрому та CONCAWE, як мінімум, розрізняють акустично «м'які» (сніг та м'який ґрунт) та «тверді» (вода та бетон) поверхні відбиття звукових хвиль, рис.8. Виконано порівняння моделей Газпрому та CONCAWE – частотний діапазон ефекту послаблення октавних РЗТ однаковий, але величина послаблення за моделлю Газпрому є більшою. В той же час модель Газпрому для смуг частот, де ефект впливу землі посилює РЗТ, просто подвоює звукову енергію в цих смугах (РЗТ = 3 дБ), а модель CONCAWE все ще передбачає вплив інтерференції звукових хвиль – прямої та відбитої від поверхні (РЗТ < 3 дБ).

Модель та методика CONCAWE дозволяє оцінити вплив метеорологічного чинника на рівні звуку для шуму від ГПА залежно від відстані поширення цього шуму. На рис.9 наведені обчислені РЗ для категорій Пасквіла А, С і G та швидкості вітру 3 м/с, і для швидкості вітру 0 м/с (вітер відсутній - залежність LAA0 на рис. 9) для порівняння. Можна побачити, що в результаті зміни стабільності атмосфери за Пасквілом від А до G РЗ для шуму на відстані 700 м (межа охоронної зони для КС, обладнаної ГПА типу ГТ-750-6 з висотою джерела шуму 10 м), можуть змінюватися *понад 10 дБА*.

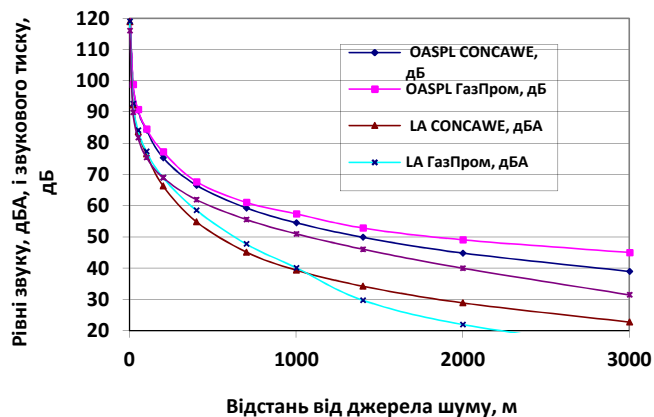


Рис. 7. Порівняння моделей Газпрому, ДСТУ та CONCAWE для базової схеми обчислення РЗТ та РЗ для висоти джерела $H_{дж}=10\text{м}$ в залежності від відстані

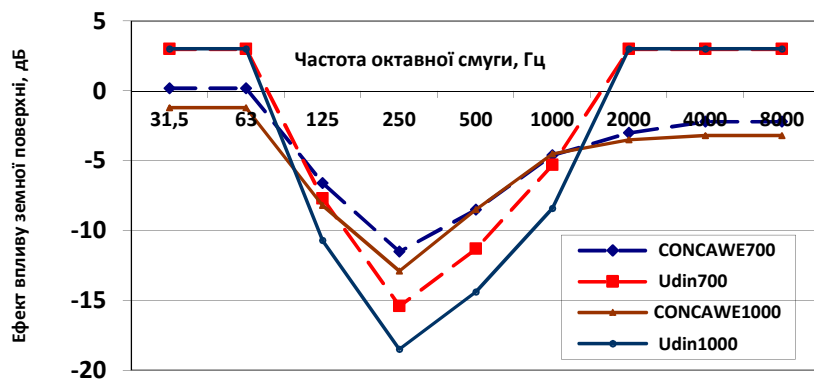


Рис. 8. Ефект впливу відбиття звукових хвиль поверхнею землі на відстані мікрофона 700 і 1000 м відповідно

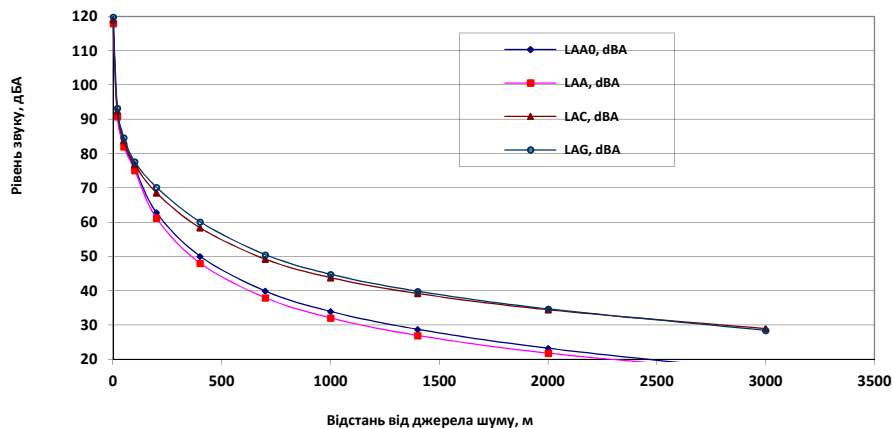


Рис. 9. Ефект впливу стану атмосфери (за категорією Пасквіла) на поширення звуку

Результати обчислення РЗ та РЗТ для окремих типів ГПА вказують на значущий вплив наступних чинників: тип ГПА; розміщення ГПА (класична, модульна, блочно-модульна схема, тощо); наявність та точність моделі послаблення РЗТ шуму ГПА за рахунок поглинання звукової енергії в атмосферному повітрі; наявність та точність моделі послаблення або посилення РЗТ шуму ГПА за рахунок впливу ефекту земної поверхні – інтерференції прямої та відбитої звукових хвиль від земної поверхні; включення моделі оцінювання впливу метеорологічних чинників, що зумовлюють рефракцію звукових хвиль в атмосферному повітрі.

Модель та програмне забезпечення *NoBel*, що розробляється в НАУ, відповідає основним умовам, що висуваються до моделей/методик обчислення шуму від КС і які наведені вище вданому розділі. За своєю структурою запропонована модель (1) відповідає аналогам ДСТУ, Газпрому та CONCAWE, її основна відмінність полягає у можливості виконувати обчислення в третино-октавних смугах частот, а також у більш обґрунтованому обчисленні поправок на ефекти коригування РЗТ уздовж відстані, на яку поширюється звукова хвиля – α , ΔL_{gr} , ΔL_{scr} , ΔL_{ref} , ΔL_{tl} . Зокрема у разі імпедансної поверхні відбивання звукової хвилі спостерігаються фазові і амплітудні зміщення між характеристиками прямої і відбитої хвиль, які формують складну інтерференційну картину – ослаблення або посилення РЗТ в окремих смугах частотного спектра. Розрахунок внеску інтерференції звукових хвиль на характеристики шуму в точці прийому здійснюється за формулою

$$\Delta L_{INT} = 10 \lg \{ 1 + S^2 |Q|^2 + 2S|Q| * [\sin(\alpha \Delta R / \lambda) / (\alpha * \Delta R / \lambda)] \cos[\beta \Delta R / \lambda + \delta] \}$$

де $S = R_1 / R_2$, $\Delta R = (R_2 - R_1)$, $\alpha = \pi(\Delta f / f_i)$, R_1 , R_2 – довжина прямого і відбитого променя; Δf – ширина частотної смуги, f_i – центральна частота смуги, λ – довжина хвилі, $\beta = 2\pi[1 + (\Delta f / f_i)^2 / 4]^{1/2}$, для 1/3-октавних смуг $\alpha = 0,725$, $\beta = 6,325$.

Для оцінювання акустичних властивостей зовнішніх поверхонь, які відбивають звукові промені, у відому модель обчислення імпедансу (адмітансу) поверхні було визначено величини ефективного опору потоку $\sigma_e(v)$, що характеризує покриття поверхні v в залежності від його виду, сезону року та метеоумов. Тоді акустичний імпеданс Z відбиваючої поверхні визначається за формулою:

$$Z = \frac{\rho_1 c_1}{\rho c} = 1 + 0,0571 [f / \sigma_e(v)]^{-0,754} - j 0,087 [f / \sigma_e(v)]^{-0,732},$$

де ρc – акустичний імпеданс повітря, $\rho_1 c_1$ – акустичний імпеданс поверхні.

Протягом року тип (та вид) покриття земної поверхні, що відбиває звукові хвилі при розповсюдженні шуму від КС (окремих ГПА КС), змінюється як завдяки змінам сезону року та метеопараметрів (особливо важливою для стану покрову є температура повітря), так і діяльності людини: пооране поле ($\sigma_e(v) = 160$ кПа с/м²), засіяне поле і сходи тільки вийшли на поверхню – типу газон, пасовище ($\sigma_e(v) = 250$ кПа с/м²), засіяне поле і сходи є високими ($\sigma_e(v) = 300 \dots 600$ кПа с/м²), сніжний покрив ($\sigma_e(v) = 10 \dots 100$ кПа с/м²), твердий ґрунт ($\sigma_e(v) = 500 \dots 1000$ кПа с/м²), асфальто-бетонне покриття ($\sigma_e(v) = 20000$ кПа с/м²), тощо. Зокрема, для приведеної висоти джерела шуму ГПА 10 м РЗ на межі охоронної зони навколо КС (700 м) можуть змінюватись в межах 10 дБА в результаті зміни покриття від акустично дуже м'якого (сніг) до дуже жорсткого (асфальто-бетон або водний покрив) – рис.10а. Аналогічні залежності спостерігаються для сумарних РЗТ шуму від ГПА – рис. 10б.

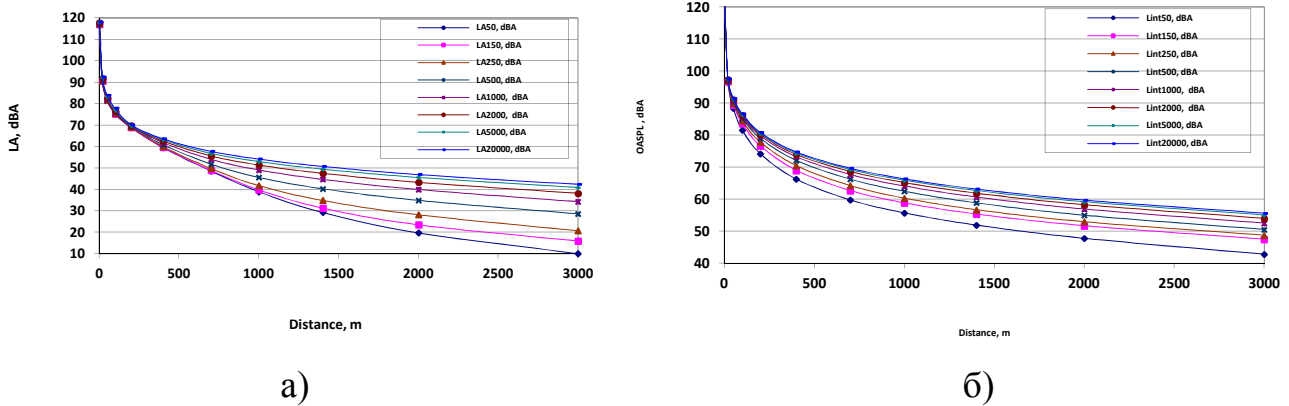


Рис. 10. Залежності РЗ у L_A (а) та сумарного РЗТ (б) від окремої ГПА (висота джерела шуму 10 м) від ефективного опору потоку σ_e поверхні, що відбиває звукові хвилі

Для дистанції 700 м від джерела шуму до точки його контролю залежності РЗ від ефективного опору потоку покриву $\sigma_e(v)$ наведені в табл. 2. Вплив акустично м'якого покриву є більш відчутним, для зміни опору потоку покриву в межах $\sigma_e(v) = 50$ -1000 різниця $\Delta L_A = L_{A\sigma} - L_{A1000}$ майже вдвічі переважає аналогічну для акустично жорстких типів покриву поверхні, що відбиває звукові хвилі.

Таблиця 2 - Залежності РЗ L_A та сумарних РЗТ OASPL від окремої ГПА (висота джерела шуму 10 м) від ефективного опору потоку покриву $\sigma_e(v)$ поверхні, що відбиває звукові промені, на відстані межі охоронної зони КС (700 м)

	Ефективний опір потоку покриву $\sigma_e(v)$, Па с/м ²							
	50	150	250	500	1000	2000	5000	20000
L_A , дБА	48,647	48,954	49,786	51,839	54,070	55,665	56,890	57,782
OASPL, дБ	59,813	62,742	64,282	66,292	67,756	68,664	69,301	69,691

Спектральний ефект земної поверхні на РЗТ в третино-октавних смугах частот в залежності від опору потоку покриву $\sigma_e(v)$ на відстані 700 м наведений на рис. 11. Найбільше послаблення спектральних РЗТ в результаті інтерференції прямої та відбитої хвилі від поверхні із заданим значенням опору потоку спостерігається в смугах низьких та середніх (100-1000 Гц) частот, величина спектрального послаблення максимальна для акустично дуже м'яких покривів поверхні відбиття. Діапазон частотних смуг, де створюється послаблення РЗТ в результаті інтерференції прямої та відбитої хвиль, ширший від спрощених моделей ГАЗПРОМ та CONCAWE (рис. 8), величина послаблення може бути більшою від «усередненого» акустично м'якого покриву поверхні відбиття. Не менш важливим результатом є посилення РЗТ в частотних смугах складання амплітуд прямої та відбитої хвиль – до 6 дБ, а не «усереднене» значення 3 дБ (як на рис. 8).

Відповідно змінюються спектральні РЗТ для шуму від ГПА в залежності від опору потоку покриву $\sigma_e(v)$ (рис. 12): в смугах низьких та середніх (100-1000 Гц) частот значення РЗТ можуть відрізнитись до 20 дБ, максимальні спектральні РЗТ спостерігаються для акустично дуже жорстких типів покриття (бетон, асфальт, водний покрив).

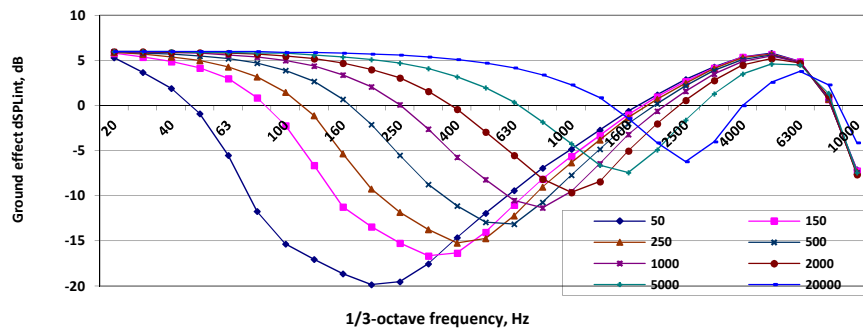


Рис. 11. Ефект впливу земної поверхні на РЗТ поширення звуку в третино-октавних смугах частот (висота джерела шуму 10 м) від ефективного опору потоку покритву $\sigma_e(\nu)$ на відстані 700 м від джерела шуму

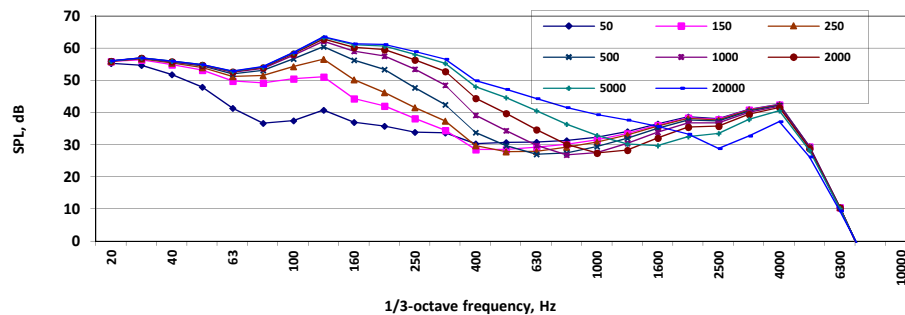


Рис. 12. Спектральні РЗТ в третино-октавних смугах частот (висота джерела шуму 10 м) від ефективного опору потоку покритву $\sigma_e(\nu)$ на відстані 700 м від джерела

У п'ятому розділі досліджено особливості джерел викиду та забруднення повітря у районах розташування КС. Забруднення атмосферного повітря при експлуатації ГПА та КС, як це відмічалось вище понад 90% обумовлено викидами продуктів згоряння природного газу від ГТУ. Для енергетичних ГТУ згідно ГОСТ Р 54403-2011 вміст NO_x (при перерахунку на NO_2) у відпрацьованих газах під час роботи на газоподібному паливі з навантаженням 0,5...1,0 від номінального не повинно перевищувати 50 мг/м^3 . Як показано вище в умовах експлуатації у результаті забруднення робочого тракту ГТУ індекси емісії можуть зростати до 20% у порівнянні (порівняно) із сертифікаційними даними, що не завжди враховується в процедурах обчислення та встановлення межі СЗЗ навколо КС.

Різниця ΔT між температурою газоповітряної суміші, що викидається, T_g і температурою навколишнього повітря T_a ($300...470^\circ\text{K}$ для досліджених ГТУ потужністю від 6 до 25 МВт), а також об'єм газів, що витікає з гирла джерела V_1 ($60...260 \text{ м}^3/\text{с}$), зумовлюють такі значення параметрів f ($3...32$) і v_m ($6...13 \text{ м/с}$), що обчислення максимальної концентрації c_m ($0,022-0,125 \text{ мг/м}^3$ для оксидів азоту) і відстані до неї ($290...770 \text{ м}$) виконується за основними формулами методики ОНД-86.

Визначальною для оцінки концентрації є висота джерела викиду в атмосферне повітря, як геометрична висота гирла труби H , так і висота спливання газів $\Delta H_{\text{еф}}$ понад гирлом за рахунок ефекту адвекції (швидкість витoku газів $w_0=9...36,5 \text{ м/с}$) і термогравітаційної конвекції. Чільним для концентрації є значення ефективної висоти $H_{\text{еф}}=H+\Delta H_{\text{еф}}$, для досліджених ГПА за моделлю Берлянда, що покладена в

методику ОНД-86, $\Delta H_{\text{эф}} = 48 \dots 224$ м, з яких термогравітаційна складова зумовлює 55%...70% від загального значення висоти спливання газів.

Особливості конструкції шахти витоку відпрацьованих газів ГПА (ГТУ) у більшості випадків зумовлюють відсутність вертикальної складової швидкості w_0 для наявного об'єму газів V_1 , що витікає з гирла джерела, бо гирла шахт обладнано дефлекторами захисту від опадів. Нормативна методика обчислення концентрацій від стаціонарних джерел викиду ОНД-86 такі умови не враховує, її основна формула визначення максимальної концентрації при наближенні значень швидкості вертикального потоку до нуля $w_0 \rightarrow 0$ та температури витоку газів до температури атмосферного повітря $T_r \rightarrow T_{\text{атм}}$ обумовлює зростання концентрації до ∞ . Параметри f , v_m , v'_m і f_e методики ОНД-86 обчислюються для значень вертикальної швидкості w_0 та перевищення температури витоку газів ΔT , які фізично можуть дорівнювати нулю. Тому діапазон значень швидкості w_0 та температури витоку газів T_r для стаціонарних джерел КС є широким, починаючи з умов нейтрального (або пасивного) шлейфу викиду газів, коли висота спливання газів $\Delta H_{\text{эф}}$ відсутня, а ефективна висота $H_{\text{эф}}$ дорівнює геометричній висоті H джерела викиду, виходячи з того, що суміш газів в шлейфі є ані легшою, ані важчою за повітря навколо джерела.

У таких випадках формули нормативної методики передбачають оцінку для умов або холодних викидів, або гранично малих небезпечних швидкостей вітру. За наявності об'єму газів $V_1 > 0$ і наближенні значень швидкості $w_0 \rightarrow 0$ у гирлі труби, використання цих формул виглядає необґрунтованим. Результати дослідження показують, що для пасивного точкового джерела викиду (для ЗР без хімічного перетворення і без осадження) нормативна методика ОНД-86 обчислює максимальні концентрації у понад 2 рази менші від досліджуваних. Зокрема скринінгова методика обчислення концентрацій для стаціонарних джерел SCREEN 3.0 Агентства Охорони Довкілля США обчислює відповідні значення висоти спливання $\Delta H_{\text{эф}}$ від 4 до 25 м і максимальні концентрації (від 0.842 до 4.94 мг/м³ для оксидів азоту) на відстані 93...274 м, які значно перевищують ПДК, у тому числі на межі охоронної зони. Для тих же умов, але за формулою Берлянда для обчислення висоти спливання, максимальні концентрації становлять 0.082...0.26 мг/м³ для NO_x на відстані 650...4300 м, тобто знаходяться за межами охоронної зони навколо КС.

Відповідно до міжнародного стандарту VDI 3783 (Environmental meteorology - Dispersion of emissions by accidental releases) виконаний чисельний аналіз поперечно-інтегральної концентрації за наведеним у стандарті тестом для стаціонарного пасивного джерела. Поперечний розподіл поля концентрації інтегрований по усій ширині шлейфу викиду, який є інтегрованою (сумарною) концентрацією, досліджується тільки уздовж вісі шлейфу – тобто за напрямком вітру $c_y(x) = \int_{-\infty}^{\infty} c(x, y, 0) dy$. Результати дослідження вказують на те, що пряме використання алгоритмів нормативної методики ОНД-86 для стаціонарного пасивного джерела викиду зумовлює у 2...3 рази менші значення максимальної поперечно-інтегральної концентрації, що утворюється на відстані у 2...3 рази більшій, ніж отримані експериментальні (тестові) результати, у тому числі й які наведені на рис. 13.

Максимум поперечно-інтегральної концентрації за методикою ОНД-86 становить:

$$C_{y_{\max}} = 3,928\varphi_0 x_{\max} C_{\max},$$

який досягає максимуму $x_{y_{\max}} = 2,7735x_{\max}$, тобто майже втричі віддалені від координати x_{\max} максимуму C_{\max} на вісі факела 20-хвилинної концентрації за формулами ОНД-86. Для порівняння знайдено максимальне значення поперечно інтегрованої концентрації для рішення Берлянда для усередненої (20 хв.) концентрації від викиду Q стаціонарного точкового джерела висотою H :

$$C_{y_{\max}} = \frac{Q(1+n)}{eu_1 \cdot H^{1+n}}; x_{\max} = \frac{H^{1+n} u_1}{(1+n)^2 K_1},$$

для рішення Берлянда для миттєвої поперечно інтегрованої концентрації:

$$C_{y_{\max}} = \sqrt{\frac{2}{\pi e}} \frac{Q}{H}; x_{\max} = \frac{H^2 \hat{u}}{2K_z},$$

де u_1, k_1, n – параметри профілів вітру та коефіцієнта вертикальної дифузії відомої моделі Берлянда, \bar{u}, k_z – усереднені значення швидкості вітру та коефіцієнта вертикальної дифузії по висоті шлейфу викиду, φ_0 – дисперсія напрямку вітру за час усереднення концентрації.

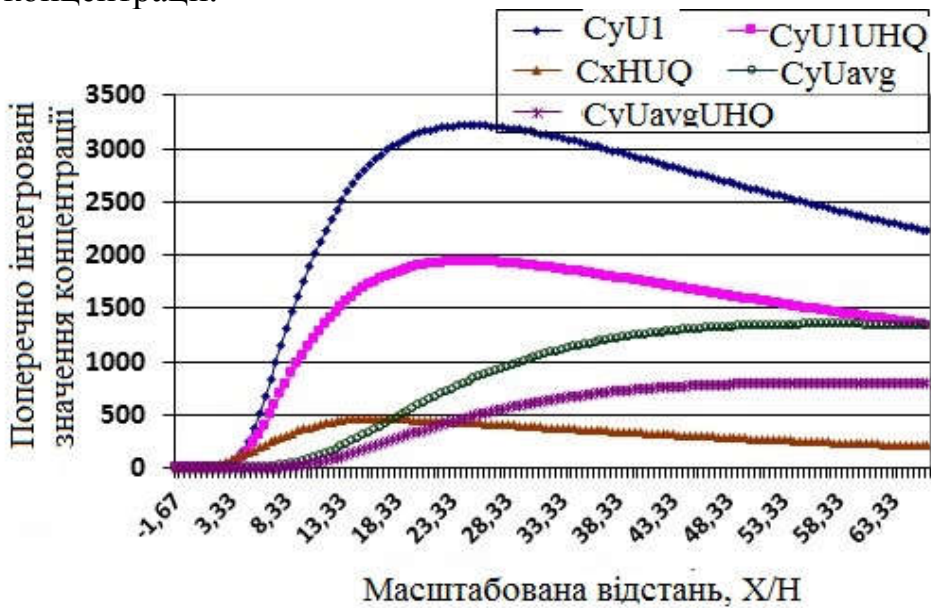


Рис. 13. Поперечно-інтегровані значення концентрації на рівні землі та їхні масштабовані значення для аналітичного рішення М. Берлянда, визначені обчислювальним методом (концентрації подано у розмірності $\text{г}/\text{м}^3$ величиною збільшеною в 10^6 разів): а – для швидкості вітру на рівні 1 м – синій ромб; б – для усередненої швидкості уздовж висоти джерела викиду – синє коло; в – масштабоване аналітичне рішення Гаусового розподілу – коричневий трикутник; г – масштабоване обчислене рішення рівняння атмосферної дифузії ЗР для швидкості вітру на рівні 1 м – рожевий квадрат; д – масштабоване обчислене рішення рівняння атмосферної дифузії ЗР для усередненої швидкості уздовж висоти джерела викиду – фіолетовий хрест

Зважаючи на наведені аргументи, досить легко пояснити відмінність результатів тестового сценарію для різних моделей. Подібно до залежностей, що

відображені на рис. 15, результати для моделі ОНД-86 у 2...3 рази нижчі від аналогічних для інших змодельованих результатів, що, в першу чергу, пояснюється впливом ефекту усереднення концентрацій, так й перебільшеним обліком спливання шлейфу викиду над гирлом джерела викиду, обґрунтованому у даній роботі. Тим же ефектом усереднення (для моделей США AERMOD та Великобританії ADMS, що застосовують рішення Гауссового розподілу для усередненої концентрації протягом однієї години) пояснюється більш широке розповсюдження поля концентрації для моделей AERMOD і ADMS, у порівнянні з моделями LASPORT (Німеччина) і PolEmission, яка розробляється в НАУ. Останні моделі розроблені для обчислення миттєвих або осереднених концентрацій (до 30 хв.), як за методикою ОНД-86.

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішене актуальне науково-практичне завдання обґрунтування моделей обчислення рівнів звуку (рівнів звукового тиску) для шуму та концентрацій забруднюючих речовин в атмосферному повітрі від стаціонарних джерел компресорних станцій магістральних газопроводів з метою визначення і нормалізації їх шкідливого впливу на довкілля й життєдіяльність людини. У роботі отримано такі наукові та практичні результати:

1. Основними небезпечними чинниками, що впливають на природне, виробниче та соціальне середовище під час експлуатації компресорних станцій магістральних газопроводів є забруднення атмосферного повітря внаслідок викидів шкідливих речовин технологічним обладнанням компресорних станцій, понад 90% якого становлять викиди відпрацьованих газів ГТУ, і шумове забруднення довкілля з рівнями звуку за межею охоронної зони КС понад нормативні ліміти державних санітарних правил ДСП-173-96, комплексним джерелом якого є газоперекачувальні агрегати різних типів. Характеристики емісії забруднюючих речовин та шуму не є постійними, вони залежать від напрацювання обладнання (його забруднення, зношення та втрати експлуатаційних властивостей) у реальних умовах навколишнього середовища, при цьому відповідні концентрації забруднення повітря та рівні звуку визначаються топографічними і метеорологічними умовами розтушування та експлуатації компресорних станцій.

2. Теоретично обґрунтовано та експериментально доведено можливість застосування полідисперсних гранул аморфного льоду для очищення поверхні лопаток осьових компресорів ГТУ від забруднень під час їхнього технічного обслуговування та ремонту, що реалізується за рахунок кумулятивного ефекту гранул при контакті з твердою поверхнею лопаток. Розроблено та запатентовано пристрій для отримання гранул льоду полідисперсного складу розміром від 2 до 5 мм. Введення крижаних гранул в ОК ГТУ здійснюється за допомогою спеціального пристрою для рівномірної подачі крижаних гранул по всьому контуру компресора ГТУ. Випробування технології очищення поверхонь крижаними гранулами довели, що продуктивність очищення та її ефективність перевищує ефективність очищення поверхонь кісточкової крихтою, а також відсутній пил від їх застосування, який осідає на поверхнях компресора та робочого тракту ГТУ. Час промивки однієї ГТУ становить 3 години.

3. Розроблено модель обчислення рівнів звуку (рівнів звукового тиску) для шуму від акустичних джерел компресорних станцій магістральних газопроводів в умовах реальної неоднорідної атмосфери з урахуванням рефракції звукових променів при поширенні в оточуючому повітрі та реальної топографії з урахуванням відбиття звукових променів від земної поверхні. Показано, що ГПА у цілому є комплексними стаціонарними джерелами шуму, моделювання яких виконується з індексом відповідності $d_2=0,8-0,9$ (обчислені спектральні РЗТ дуже подібні до виміряних). Залежно від типу ГПА переважаючими акустичними джерелами є шахта витоку відпрацьованих газів ГТУ та технологічна обв'язка ГПА. Для дистанцій контролю шуму від ГПА, що переважають радіус межі охоронної зони КС, оцінювання рівнів звуку для шуму від окремого ГПА доцільно здійснювати як для приведенного точкового джерела з висотою переважаючого акустичного джерела над земною поверхнею.

4. Рівні звуку в точці контролю шуму від ГПА або від КС у цілому значно залежать від типу поверхні, що відбиває звукові хвилі під час поширення звуку від джерела утворення шуму, імпедансні властивості якої змінюються як відповідно до сезону року, метеорологічних умов, так і до характеру використання земель навколо станції (в межах охоронної зони). Отримані залежності рівнів звуку від параметру ефективного опору потоку $\sigma_e(v)$, що застосовується для визначення імпедансу покриття поверхні, яка відбиває звукові промені, значення якого в залежності від типу поверхні досліджені ($\sigma_e(v) = 10 \dots 20000$ кПа с/м²) і наведені в роботі. Зокрема для приведеної висоти джерела шуму ГПА 10 м РЗ на межі охоронної зони навколо КС (700 м) можуть змінюватись в межах 10 дБА в результаті зміни покриття від акустично дуже «м'якого» (сніг) до дуже «жорсткого» (асфальто-бетонний або водний покрив) і переважати нормативи державних санітарних правил ДСП-173-96.

5. Для метеорологічних умов, що відповідають стабільності атмосфери за категорією Пасквіла G, які найчастіше спостерігаються протягом нічного періоду доби, рівні звуку на межі охоронної зони компресорної станції можуть на 10 дБА перевищувати рівні звуку для умов атмосфери за категорією Пасквіла А-С. Для цілодобової експлуатації обладнання КС саме норматив для ночі 45 дБА за вимогами ДСП-173-96 є лімітом, що доцільно враховувати для обґрунтування границь санітарно-захисної зони навколо КС.

6. Удосконалено модель обчислення концентрацій забруднення повітря викидами стаціонарних джерел компресорних станцій шляхом уточнення ефективної висоти джерел викиду за відсутності вертикальної складової швидкості об'єму газів, що витікає з гирла джерела, та спливання газів тільки за рахунок термогравітаційної конвекції, яка виникає у полі гравітації унаслідок різниці температур між об'ємом газів, що витікає, та навколишнього повітря. У порівнянні з результатами застосування нормативної методики ОНД-86 удосконалення стосовно визначення ефективної висоти джерела викиду дозволяє обчислювати 2-4 разів більші максимальні концентрації, які можуть перевищувати ПДК на межі охоронної зони станції. Встановлено, що протягом експлуатації параметри емісії ЗР для ГТУ збільшуються до 20% і для обчислення та обґрунтування границь СЗЗ слід застосовувати експлуатаційні значення (за наявності) замість сертифікаційних.

7. Обґрунтовано напрям утилізації відпрацьованих мастил при створенні зразків палива із композицій опалого листа з вугіллям, горючим сланцем і відходами відпрацьованих нафтопродуктів ГТУ ГПА КС. Результати екологічної експертизи показали, що паливо на основі опалого листа під час згоряння має задовільні показники шкідливих викидів та мають задовільну середню зольність у межах 9...11 % і не становить загрози навколишньому середовищу. Визначено основні технічні та фізико-хімічні вимоги до опалого листа та наповнювачів під час його використання як сировини для виготовлення палива.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у наукових фахових виданнях України

1. Запорожець О.І., Савченко В.І., Карабцов Г.П., Соловейкіна А.К., **Карпенко С.В.** Паливо з біомаси на основі опалого листа. Вісник НАУ. 2010. № 1. С. 185-190. (Наукове фахове видання України) *Особистий внесок здобувача: полягає у виконанні досліджень, аналізуванні результатів та узагальненні інформації.*

2. Запорожець О.І., Савченко В.І., **Карпенко С.В.** Обґрунтування нової технології очищення осьових компресорів газотурбінних установок. Вісник НАУ. 2010. № 2. С. 10-14. (Наукове фахове видання України) *Особистий внесок здобувача: у виконанні порівняльних досліджень, аналізуванні результатів та узагальненні інформації.*

3. Запорожець О.І., Мовчан Я.І., Гроза В.А., Савченко В.І., Соловейкіна А.К., **Карпенко С.В.**, Шевченко Ю.С. Чинники формування екологічного стану урбанізованого довкілля. Вісник НАУ. 2010. № 4. С. 94-99. (Наукове фахове видання України) *Особистий внесок здобувача: у аналізуванні літературних джерел та узагальненні інформації.*

Публікації у фахових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних

4. Пузік С.О., Пузік О.С., Мельник В.Б., Опанасенко В.Ф., **Карпенко С.В.**, Вареник А.В. Процеси забезпечення якості підготовки до оброблення повітряних суден протиліодотвірними рідинами. Проблеми тертя та зношення. 2017. №2 (75). С. 120-128. (Входить до наукометричних баз даних Index Copernicus, РІНЦ, EBSCO, WorldCat, GoogleScholar, Crossref) *Особистий внесок здобувача: у аналізуванні літературних джерел та узагальненні інформації.*

5. Запорожець О.І., Пузік С.О., **Карпенко С.В.**, Синило К.В., Вареник А.В. Інвентаризація викидів забруднювальних речовин із резервуарів складів пально-мастильних матеріалів. Проблеми тертя та зношення. 2017. №4 (77). (Входить до наукометричних баз даних Index Copernicus, РІНЦ, EBSCO, WorldCat, GoogleScholar, Crossref) *Особистий внесок здобувача: в обчисленні інвентаризації та узагальненні інформації, формулюванні висновків.*

6. Запорожець О.І., Пузік С.О., **Карпенко С.В.**, Вапнічний А.Б. Підвищення екологічної безпеки повнорозмірного стенду дослідження очисників палив шляхом його модернізації. Проблеми тертя та зношення. 2020. №4 (89). (Входить до наукометричних баз даних Index Copernicus, РІНЦ, EBSCO, WorldCat, GoogleScholar, Crossref) *Особистий внесок здобувача: у створенні стенду, виконанні досліджень, узагальненні інформації, формулюванні висновків.*

7. **Карпенко С.В.** Забруднення поверхонь осьового компресора газотурбінної установки та їх екологічні наслідки. Проблеми тертя та зношення. 2021. №2 (91). С.87-97. (Входить до наукометричних баз даних IndexCopernicus, РІНЦ, EBSCO, WorldCat, GoogleScholar, Crossref). *Особистий внесок здобувача: в дослідженні забруднення та узагальненні інформації, формулюванні висновків.*

8. Запорожець О.І., **Карпенко С.В.**, Синило К.В., Крупко А. Уточнення обчислювальної моделі оцінки забруднення повітря викидами стаціонарних джерел аеропортів та компресорних станцій. Східно-Європейський журнал передових технологій. 2021. №3/10 (111). С.54-64. (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази даних Scopus, EBSCO, DOAJ, Open AIRE, BASE, Index Copernicus). *Особистий внесок здобувача: у дослідженні та удосконаленні моделі, виконанні обчислень та узагальненні результатів.*

Матеріали доповідей на науково-практичних конференціях

9. Запорожець О.І., Карабцов Г.П., Соловейкіна А.К., Хлисту́н Л.П., Савченко В.І. **Карпенко С.В.** Інгібіторні рідини, їх застосування в складі суспензій для очищення поверхонь АГД-способом. Безпека життєдіяльності людини – освіта, наука, практика: Матеріали МНТК. К.: НАУ. 2005. С. 23-25.

10. Запорожець О.І., Соловейкіна А.К., Карабцов Г.П., Савченко В.І., **Карпенко С.В.** Поліфункціональна композиційна суміш. Проблеми хімотології. I Міжнар. наук. техн. конф.: К.: НАУ. 2006. С. 27-31.

11. Карабцов Г.П., Соловейкіна А.К., **Карпенко С.В.** Використання екологічно-безпечних композиційних рідин у промисловості, транспорті та побуті. Проблеми хімотології. II Міжнар. наук. техн. конф. К.: НАУ, 2008. С. 22-23.

12. Запорожець О.І., Карабцов Г.П., Соловейкіна А.К., Савченко В.І., **Карпенко С.В.** Створення нової технології одержання палива з біомаси на основі опалого листа. Безпека життєдіяльності людини – освіта, наука, практика: Матеріали МНТК. – К.: НАУ. - 2005. – С. 32-33.

13. **Karpenko S.** Reduction of environmental pollution during operation of axial compressors of gas turbine units. Екологічна безпека держави. XIV Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів, 23 квітня 2020 р. С.45-46.

14. Zaporozhets O., Synylo K., Krupko A., **Karpenko S.** Modeling of Local Air Quality for Stationary Sources: Simple Test Cases // International Symposium on Electric Aviation and Autonomous Systems 2020 (ISEAS – 2020), International Symposium On Aircraft Technology, MRO & Operations (ISATECH – 2020), 22 - 24 September 2020, Kyiv, Ukraine: Abstractsbook. K., 2020, P. 78 (ISBN: 978-605-80140-4-6).

15. **Карпенко С.В.** Актуальність визначення рівнів звуку шуму від компресорних станцій. Problems of chemmotology. VIII International Scientific-Technical Conference. Kiyv - Kamianets-Podilskyi. 2021. С.69.

16. O. Zaporozhets, **S. Karpenko**, L. Levchenko. Calculation tool NoBel for sound propagation assessment of noise from gas turbines on the ground. Inter Noise 2021 Proceedings, Final Book of Abstracts, Washington, USA, 1-5 August. 2021, с. 121. (DOI: <https://doi.org/10.3397/IN-2021-2717>, входить до переліку міжнародної наукометричної бази даних Scopus).

Патенти

17. Патент u2017001711, МПК C10L5/00, Спосіб утилізації відходів у вигляді опалого листа Заявл. 18.02.2010. Запорожець О.І., Соловейкіна А.К., Карабцов Г.П., Савченко В.І., Карпенко С.В. №52029 від 10.08.2010 р.

18. Патент на корисну модель. Запорожець О.І., Соловейкіна А.К., **Карпенко С.В.** Патент України u201105003, МПК C09K5/00, Технічна рідина. Заявл. 20.04.2011. №65016 від 25.11.2011р.

19. Патент на корисну модель. Запорожець О.І., **Карпенко С.В.**, Пузік С.О. Патент України u2017 10314, МПК F25C1/10, Пристрій для отримання водяних гранул льоду різного діаметру, охолоджених до температури рідкого азоту. Заявл. 26.10.2017. №131499 від 25.01.2019 р.

20. Патент на корисну модель. Запорожець О.І., **Карпенко С.В.**, Пузік С.О. Патент України u2021 02241, МПК B08B9/08. Пристрій очищення внутрішньої поверхні резервуара стенда для дослідження силових очисників авіаційного палива. Заявл. 12.04.2021. №148371 від 28.07.2021 р.

АНОТАЦІЯ

Карпенко С. В. Нормалізація впливу на довкілля шуму та викидів забруднюючих речовин компресорних станцій магістральних газопроводів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – «Екологічна безпека» – Національний авіаційний університет, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню ефективності засобів та методів нормалізації стану довкілля в умовах впливу шуму та викидів забруднюючих речовин від компресорних станцій магістральних газопроводів. У роботі досліджені методи очищення лопаток ротора та направляючого апарату компресора ГТУ від забруднень на основі застосування екологічно чистих матеріалів, а також чинники та джерела фізичного і хімічного забруднення атмосферного повітря на компресорних станціях магістральних газопроводів. Теоретично обґрунтовано та експериментально доведено можливість застосування полідисперсних гранул аморфного льоду (розміром 2...5 мм) для очищення поверхні лопаток осьових компресорів ГТУ від забруднень під час їх технічного обслуговування та ремонту, що реалізується за рахунок кумулятивного ефекту гранул при контакті з твердою поверхнею лопаток. Розроблено та запатентовано пристрої для отримання гранул льоду та для очищення забруднених поверхонь крижаними гранулами.

Показано, що ГПА у цілому є комплексними та стаціонарними джерелами шуму, вони досліджені експериментально та із застосуванням розробленої обчислювальної моделі. Отримані залежності рівнів звуку від параметру ефективного опору потоку σ_e (10...20000 кПа с/м²), який застосовується для визначення імпедансу покриття поверхні, що відбиває звукові промені, значення якого від типу поверхні досліджені і наведені в роботі.

Удосконалено модель обчислення концентрацій забруднення повітря викидами стаціонарних джерел компресорних станцій шляхом уточнення ефективної висоти джерел викиду за відсутності вертикальної складової швидкості

об'єму газів, що витікає з гирла джерела в одиницю часу, та спливання газів тільки за рахунок термогравітаційної конвекції, яка виникає завдяки різниці температур між об'ємом газів, що витікає, та навколишнього повітря.

Ключові слова: охорона довкілля, компресорна станція, газотурбінна установка, шум, забруднення повітря, стаціонарне джерело, модель обчислення.

ABSTRACT

Karpenko SV Normalization of environmental impact of noise and emissions from compressor stations of the main gas pipelines. - Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 21.06.01 - "Ecological safety" - National aviation university, Kyiv, 2021.

The thesis is devoted to efficiency of means and methods to control the impact of noise and emissions on environment from the compressor stations of the gas pipelines.

The cleaning methods of the rotor blades and compressor apparatus of gas turbines from their surface contamination have been studied by the application of environmentally friendly materials, as well as the factors and sources of physical and chemical air pollution from compressor stations. The possibility of using polydisperse granules of amorphous ice (size of 2 to 5 mm) to clean the surface of the blades of axial compressors of gas turbines from contamination during their maintenance and repair is theoretically substantiated and experimentally proved. It is realized due to the cumulative effect of granules in contact with the solid surface of the blades. A device for obtaining ice polydispersed granules and a special device for cleaning the surfaces have been developed and patented.

It is shown that gas pumping units in general are complex and stationary noise sources, they are studied experimentally and using a developed calculation model. The dependences of sound levels from effective flux resistance σ_e (10...20000 kPa s/m² depending on the type of surface), which is used to determine the impedance of the surface covering that reflects sound rays, were studied and given in the thesis.

The calculation model of air pollution concentrations produced by emissions from stationary sources of compressor stations has been improved by specifying the effective height of emission sources in the absence of a vertical component of the gas volume flowing from the source per unit time and only gas uplift due to Archimedes forces defined by the temperature difference between the exhaust gases and the ambient air.

Key words: environmental protection, compressor station, gas turbine installation, noise, air pollution, stationary source, calculation model, measurement.