

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Карпенко Сергій Володимирович**

дисертація УДК 504.064:628.517.2+504.062.4:656.01:661.91 (043.5)

**ДИСЕРТАЦІЯ**

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

Спеціальність 21.06.01 – екологічна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ С.В. Карпенко

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор Запорожець О.І

Київ – 2021

## АНОТАЦІЯ

*Карпенко С. В.* Нормалізація впливу на довкілля шуму та викидів забруднюючих речовин компресорних станцій магістральних газопроводів. – Рукопис.

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 впливу на довкілля шуму та викидів забруднюючих речовин компресорних станцій магістральних газопроводів.

У роботі досліджувались 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 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 пристрій для отримання гранул льоду полідисперсного складу розміром від 2 до 5 мм. та спеціальний пристрій для очищення поверхонь крижаними гранулами.

Показано, що ГПА у цілому є комплексними та стаціонарними джерелами шуму, вони досліджені експериментально та із застосуванням обчислювальної моделі. Отримані залежності рівнів звуку від параметру ефективного опору потоку  $\sigma_e$ , який застосовується для визначення імпедансу покриття поверхні, що відбиває звукові промені, значення якого в залежності від типу поверхні досліджені ( $\sigma_e=10 - 20000$  кПа с/м<sup>2</sup>) 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 унаслідок різниці температур між об'ємом газів, що витікає, та навколишнього повітря.

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

## ABSTRACT

Karpenko S. Normalization of environmental impact of noise and pollutant emissions of compressor stations of 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 dissertation work is devoted to increase of efficiency of means and methods to regulate the influence on environment of noise and pollutants emissions from the main gas pipelines if compressor stations.

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

It is shown that gas pumping units in general are complex and stationary noise sources, they are studied experimentally and using a computational model. The

dependences of sound levels on the parameter of effective flux resistance  $\sigma_e$ , which is used to determine the impedance of the surface coating that reflects sound rays, the values of which depending on the type of surface were studied ( $\sigma_e = 10\text{-}20000 \text{ kPa s/m}^2$ ) and are given in the work.

The model for calculation of air pollution concentrations 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 mouth of the source per unit time and gas uplift only Archimedes in the gravitational field due to the temperature difference between the volume of exhaust gases and the ambient air.

The possibility of cleaning the surface of the blades of axial compressors of gas turbine units from contamination during their maintenance and repair with the use of amorphous ice granules, devices for obtaining ice granules and installation for their use to clean the blades of axial compressors installations. Fuel samples were developed from compositions of fallen leaves with coal, oil shale and oil products waste, which allowed the utilization of waste oils from gas turbine units of gas pumping units of compressor stations and fallen leaves.

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



## 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 листя. 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 протильодотвірними рідинами. Проблеми тертя та зношення. 2017. №2 (75).

С. 120-128. (Входить до наукометричних баз даних Index Copernicus, *PIHЦ*, *EBSCO*, *World Cat*, *Google Scholar*, *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, *PIHЦ*, *EBSCO*, *World Cat*, *Google Scholar*, *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, *PIHЦ*, *EBSCO*, *World Cat*, *Google Scholar*, *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 Index Copernicus, *PIHЦ*, *EBSCO*, *World Cat*, *Google Scholar*, *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 науково-метричної 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., Хлистун 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 листя. 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: Abstracts book. 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 науково-метричної бази даних Scopus)

### *Патенти*

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

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.**, Пузій 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 25.01.2019р.

20. Патент на корисну модель. Запорожець О.І., **Карпенко С.В.**, Пузій 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.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ</b>	13
<b>ВСТУП</b>	14
<b>РОЗДІЛ 1</b>	
<b>КОНТРОЛЬ ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ КОМПРЕСОРНИМИ СТАНЦІЯМИ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ</b>	20
1.1. Види забруднення атмосферного повітря та їх вплив на навколишнє середовище	20
1.2. Забруднення лопаток осьового компресора	40
1.3. Характеристика існуючих методів очищення ОК ГТУ від забруднень	46
1.4. Нормативна охоронна зона навколо ГТС та КС	49
1.4.1. Базовий сценарій обчислення викидів ЗР у повітря та рівнів звуку для шуму КС	55
Висновки до Розділу 1	58
<b>РОЗДІЛ 2</b>	
<b>ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ЗАБРУДНЕННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ЗАБРУДНЕНЬ ОК ГТУ</b>	60
2.1. Дослідження процесу забруднення лопаток компресора ГТУ	60
2.2. Дослідження забруднення лопаток осьового компресора	64
2.3. Вплив експлуатаційних забруднень ОК ГТУ на ефективність його роботи	70
2.4. Технологія очищення осьових компресорів ГТУ від забруднень гранулами аморфного льоду	74
2.5. Очищення від забруднень ОК ГТУ за допомогою гранул льоду на холодному прокручуванні і на інших режимах роботи. Оцінка його екологічної ефективності	79
2.6. Паливо з біомаси на основі опалого листя	85
Висновки по Розділу 2	87

### **РОЗДІЛ 3**

#### **ВИМІРЮВАННЯ РІВНІВ ЗВУКУ ДЛЯ ШУМУ КОМПРЕСОРНОЇ СТАНЦІЇ**

3.1. Об'єкт інструментального дослідження шуму компресорної станції	89
3.2. Рівні звуку від випромінювання шуму ГПА на території КС	90
3.2.1. Рівні звуку від випромінювання шуму ГТУ через стінку укриття	95
3.2.2. Рівні звуку від шахти всмоктування повітря ГПА	96
3.2.3. Рівні звуку від шахти витоку газів КТУ, що відпрацювали	99
3.2.4. Рівні звуку від технологічної обв'язки нагнітача	103
3.2.5. Рівні звуку від ГПА у цілому	105
Висновки по Розділу 3	109
	113

### **РОЗДІЛ 4**

#### **ОБҐРУНТУВАННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ МОДЕЛІ РІВНІВ ЗВУКУ ДЛЯ ШУМУ КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ**

4.2. Алгоритм розрахунку очікуваних рівнів звукового тиску від КС	114
4.2.1. Алгоритм ДСТУ-Н Б В.1.1-33:2013	115
4.2.2. Алгоритм СТО ГАЗПРОМ	115
4.2.3. Розрахунок для схеми компресорного цеху №2 КС «Яготин»	117
4.2.4. Обчислення рівнів звуку для шуму КС з урахуванням стану атмосфери	120
4.2.4.1. Модель обчислення рівнів звуку CONCAWE	122
4.2.4.2. Удосконалення моделі обчислення рівнів звуку від компресорної станції з урахуванням реальних умов експлуатації ГПА	122
4.2.4.2.1. Напрацювання моделі впливу ефекту земної поверхні – інтерференції прямої та відбитої звукових хвиль від земної поверхні	127
4.2.4.2.2. Дослідження впливу типу покриву земної поверхні, що відбиває звукові хвилі	131
Висновки по Розділу 4	134
	143

<b>РОЗДІЛ 5</b>	
<b>ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ ВИКИДАМИ ВІД КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ</b>	145
5.1. Особливості джерел забруднення повітря в районі розташування компресорних станцій	145
5.1.1. Умови викиду ЗР з відпрацьованими газами ГТУ через шахти витоку газів ГПА і його розсіювання в атмосфері	147
5.2. Аналіз аналітичних та чисельних рішень моделі Гауса	154
5.3. Аналіз вихідних моделей нормативного документу ОНД-86	159
5.3.1. Ефект осереднення концентрації	161
5.3.2. Дослідження розрахункових залежностей методики ОНД-86	167
Висновки по Розділу 5	173
<b>ВИСНОВКИ</b>	175
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ</b>	178
Додаток А	193
Додаток Б	202
Додаток В акт впровадження ДП «410 завод ЦА»	230
Додаток Г акт впровадження ТОВ ПФК «Технополіус»	232



## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

КС – компресорна станція

ГТУ – газотурбінна установка

ГПА – газоперекачувальний агрегат

ГТС – газотранспортна система

РЗ – рівень звуку

РЗТ – рівень звукового тиску

ОК – осьовий компресор

ЗР – забруднююча речовина

ККД – коефіцієнт корисної дії

СЗЗ – санітарно-захисна зона

ВНА – вхідний направляючий апарат

КНТ – компресор низького тиску

КВТ – компресор високого тиску

ТНТ – турбіна низького тиску

ТВТ – турбіна високого тиску

ОВД – оцінка впливу на довкілля

ОВНС – оцінка впливу на навколишнє середовище

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Якість повітря поблизу 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 протягом усього життєвого циклу виробничої свердловини та подальшого транспортування нафти й газу; 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 їх концентрацій в повітрі, та виконанні дослідження якості повітря припускають несприятливі наслідки для мешканців поблизу інфраструктури видобутку й транспортування нафти та газу.

Дослідження, проведені багатьма вітчизняними і зарубіжними авторами показують, що леткі сполуки, включаючи небезпечні забруднювачі повітря 1-4 класу небезпеки, а також рівні звуку від процесів компримування газу на компресорних станціях (КС), можуть перевищувати національні нормативи стану атмосферного повітря та викликають занепокоєння населення, що мешкає в околиці газотранспортних магістралей.

Найбільший негативний вплив на навколишнє середовище утворюють викиди природного газу та продуктів згоряння природного газу та/або інших видів палив КС. Функціонування обладнання КС супроводжується викидом в атмосферу понад 20 найменувань ЗР, серед них такі, що утворюють 4 групи речовин, які мають ефект сумачії шкідливого впливу (на людину). На частку викидів продуктів згоряння палива в газотурбінних установках (ГТУ) газоперекачувальних агрегатів (ГПА) припадає за обсягом 98-99% всіх валових викидів в атмосферу від стаціонарних джерел КС.

У реальних умовах експлуатації ГПА, які розташовані на відкритій місцевості, де відкрита 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, й, 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 умовах поверхні лопаток ротора та направляючих апаратів компресора періодично очищують за допомогою водних розчинів технічних мийних засобів («Синвал», «Прогрес», М1, тощо) або твердих органічних частинок кісточкової крихти, рису, твердої пшениці. Результати виробничих іспитів миття компресорів ГТУ водними розчинами свідчать про те, що площа промивання поверхні лопаток становить не більше 40–50% їх загальної площі. У разі застосування способу очищення за рахунок інтенсивного руйнування твердих частинок при їх зіткненні з поверхнею рухомих деталей ГТУ утворюється велика кількість дрібнодисперсного пилу (середній розмір частинок від 0,5 до 5,0 мкм), що осідає на покритих масляною плівкою поверхнях деталей ГТУ, що призводить до додаткового забруднення таких деталей. Таким чином, існуючі способи миття і очищення лопаток компресора ГТУ є недостатньо ефективними.

Встановлення границі СЗЗ на межі охоронної зони КС не завжди є обґрунтованим, особливо в частині контролю несприятливого впливу шуму КС. Рівні звуку понад 45 дБА (норматив Державних санітарних правил для нічного періоду доби) спостерігаються за межами охоронної зони КС (на відстані 700 м від огорожі компресорної станції) і на сьогодні контроль 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. Законодавчо введені обмеження, що діють в охоронних зонах об'єктів магістральних трубопроводів, забороняють застосовувати смуги зелених насаджень, що зазвичай рекомендуються як засіб організації СЗЗ звичайних промислових та транспортних об'єктів, забороняють їх застосування у межах охоронних зон об'єктів КС та ГТС у цілому.

У зв'язку з цим удосконалення наявних, створення нових, екологічно безпечних технологічних процесів експлуатації та очищення 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» (номер державної реєстрації 0120U102030, 2020–2022 рр.).

**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 та їхнього впливу на довкілля;

- удосконалити існуючі 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 умови поширення звуку від провідних акустичних джерел ГПА в реальних (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 деталей 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 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 тільки за рахунок термогравітаційної конвекції у наслідок різниці температур між об'ємом газів, що витікають, та навколишнього повітря;

*подальшого розвитку набуло* створення зразка 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 на холодному прокручуванні і на інших режимах роботи ГТУ. 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.

Розроблена методика обчислення рівнів звуку (рівнів звукового тиску) для шуму джерел компресорних станцій магістральних газопроводів в умовах 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, Україна, 2005); I і II МНТК «Проблеми хімотології» (м. Київ, Україна, 2006; 2008); XIV Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів (м. Київ, Україна, 2020); Aviation in the XXI-st Century. Safety in Aviation and Space Technologies: The Xth World Congress (м. Київ, Україна, 2020); 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); International Conference «Inter-Noise 2021» (Washington, USA, 2021).

**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, 73 рисунка, бібліографію із 164 посилань та 4 додатки.

# 1 КОНТРОЛЬ ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ КОМПРЕСОРНИМИ СТАНЦІЯМИ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ

## 1.1. Види забруднення атмосферного повітря та їх вплив на навколишнє середовище

На сьогодні людством споживається величезна кількість вуглеводнів. Нові технології буріння і стимуляції видобувних свердловин, такі як горизонтальне буріння, гідравлічний розрив пласта та інші, сьогодні широко застосовуються у світі. Вони дозволяють збільшити видобуток та транспортування нафти та газу, але недостатня увага приділяється їх впливу на навколишнє середовище та здоров'я і благополуччя населення. Якість повітря поблизу нафтогазових операцій видобутку й транспортування є недостатньо вивченою проблемою охорони довкілля та здоров'я людини з п'яти причин: (1) увага приділялась більшою мірою тільки до загроз втрати якості поверхневих та підземних вод; (2) недостатнє розуміння внеску у якість повітря певних процесів видобутку протягом усього життєвого циклу виробничої свердловини та подальшого транспортування нафти й газу; (3) наявність обмеженої державної мережі моніторингу якості повітря, що не охоплює всі значущі джерела та чинники впливу на довкілля; (4) існування значної мінливості викидів забруднюючих речовин (ЗР) в атмосферу та їх концентрацій в повітрі, та (5) виконані дослідження якості повітря припускають несприятливі наслідки для мешканців поблизу інфраструктури видобутку й транспортування нафти та газу. Попередні дослідження показують, що леткі ЗР, включаючи небезпечні забруднювачі повітря, викликають постійне занепокоєння населення. Традиційні і нетрадиційні методи видобутку нафти та газу зумовлюють виведення на поверхню, у разі добування природного газу, метан (78,3%), неметанові вуглеводні (17,8%), азот (1,8%), вуглекислий газ (1,5%) та сірководень (0,5%) [1]. Ці складові, а також викиди від процесів горіння газу на поверхні, надходять у повітря протягом усього життєвого циклу виробничої свердловини та подальшого транспортування газу до споживача.



За даними за 2020 рік, оприлюднених Державною службою статистики [2], процеси спалювання в енергетичних галузях промисловості наносять найбільшу шкоду атмосферному повітрю в Україні. За видами економічної діяльності в Україні у 2020 р. найбільшими забруднювачами атмосферного повітря викидами забруднюючих речовин і парникових газів від стаціонарних джерел викидів були:

- виробництво коксу та продуктів *нафтоперероблення* - 29936 т викидів (зменшення у порівнянні з 2019 роком на 6,3%);
- добування кам'яного та бурого вугілля - 290674 т (зменшення на 5,6%);
- *добувна промисловість* і розроблення кар'єрів - 365586 т (зменшення на 12,7%);
- металургійне виробництво - 729854 т (зменшення на 1,7%);
- *постачання* електроенергії, *газу*, пари та кондиційованого повітря - 849232 т (зменшення на 21,6%).

Історично моніторинг якості повітря націлений на міські (населені) райони та ЗР повітря, такі як тверді частки та прекурсори озону, були основними хімічними речовинами, що викликають занепокоєння [3]. Станції моніторингу, що були розроблені і наразі діють тільки для забезпечення оцінки відповідності національним стандартам якості навколишнього повітря для півдесятка забруднюючих речовин (ЗР). Навіть мережі, орієнтовані безпосередньо на викиди нафти та газу, такі як мережа, що експлуатується державною службою охорони здоров'я в ряді штатів та округів США, не націлені на окремі свердловини та компресорні станції [4]. Наприклад, комісія штату Техас (США) з якості навколишнього середовища, мабуть, має найширшу мережу моніторингу викидів нетрадиційних нафти та газу в атмосферу в нафтогазових регіонах. Її монітори були розміщені для мінімізації впливу міських джерел та цільових місць, де громадськість може зазнати шкоди від викидів в атмосферу [5]. Як, наприклад, в регіоні Ігл-Форд-Сланці (штат Техас, США) є п'ять постійних станцій моніторингу, де з 2008 року пробурено понад 7000 нафтових та газових свердловин [6]. Крім значної кількості потенційних джерел (свердловин), ці та інші обмежені мережі

моніторингу потенційно маскують наслідки унікальної топографії і метеорології та надходження викидів в атмосферу на певних свердловинах.

Поточне дослідження відрізняється від попередніх досліджень тим, що зосереджується на інтересах громад, що мешкає поблизу газотранспортної інфраструктури і може зазнавати несприятливого впливу від її чинників забруднення довкілля. На основі цього підходу в чинній роботі визначаються концентрації летких сполук та рівні шуму у повітрі поблизу об'єктів та під час операцій, що створюють занепокоєння громад, та вказує на необхідність більш щільного і постійного моніторингу в точках життєвого циклу виробництва: летючі органічні сполуки, поліциклічні ароматичні вуглеводні та інші ЗР, такі як оксиди азоту ( $\text{NO}_x$ ) й зважені частки ( $\text{PM}_{2,5}$  й інші), можуть виділятися як безпосередньо на свердловинах видобування газу, так і під час контрольованого спалювання вуглеводнів в процесах транспортування газу, включаючи серед інших джерел газотурбінне устаткування компресорних станцій, дизельне обладнання та вантажні автомобілі, резервуари для накопичення води, різних видів палива і відпрацьованих олив [7].

Сьогодні в газотранспортних компаніях застосовуються технології [8], що в принципі спрямовані на зменшення викидів та скидів у довкілля, такі як технології з перекачування газу із застосуванням мобільних компресорних установок, перепуск частини газу з ремонтіваних ділянок газопроводу у сусідні ділянки, тощо. У газодобувних дочірніх товариствах проводять технологічні дослідження свердловин без викиду природного газу в атмосферу, застосовують багатоконпонентні склади поверхнево-активних речовин, що поліпшують умови видалення пластової рідини із свердловин і таким чином скорочують викиди газу в атмосферу.

Так склалося, що споживання країнами Західної і центральної Європи вуглеводнів та нерівномірність розміщення їх родовищ робить Україну, через її географічне розташування і наявну розвинуту мережу газо- та нафтопроводів, важливим транспортним вузлом між країнами-експортерами та країнами-споживачами. Для збереження конкурентоспроможності і привабливості для експортерів актуальною є проблема зменшення енергетичних витрат на

транспортування природного газу, нафти та підвищення надійності лінійної частини системи, компресорних і газо-нафто-перекачувальних станцій та підземних газосховищ.

Газотранспортна мережа України об'єднує близько 37,1 тис. км газопроводів, зокрема довжина магістральних газопроводів становить 22,2 тис. км. На всій довжині газопроводу більш-менш рівномірно (в середньому через 100–150 км) розподілені компресорні станції, функція яких полягає в підтримці необхідного тиску та швидкості руху газу в трубі (оскільки через тертя газу об стінки труби два останні показники мають тенденцію до зниження). Компресори підтримують тиск (а відповідно і пропускну спроможність газопроводу), додаючи необхідний об'єм газу. Газотранспортна система України (ГТС) об'єднує 71 компресорну станцію (КС) з 702 газоперекачувальними агрегатами загальною потужністю 5,6 млн. кВт [9]. Крім того КС обладнуються устаткуваннями для осушення, очищення, одоризації газу (одорант – речовина, що додається в газ і додає йому характерний різкий запах). На компресорних станціях є хімічні лабораторії, що періодично проводять аналізи води, масла та інших робочих речовин, а також перевіряють загазованість об'єктів. Велика кількість шкідливих речовин, що надходять у навколишнє середовище під час використання природного газу, призводить до істотних змін в атмосфері, водоймах, підземних водоносних горизонтах, ґрунтах і рослинах.

Система транспортування газу чинить найбільший внесок у загальні обсяги викидів забруднюючих речовин (ЗР) в атмосферне повітря – добича, підземне зберігання та переробка на порядок менші за своїми внесками (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 - Динаміка валових викидів ЗВ в атмосферне повітря за видами основної діяльності ПАТ «Газпром», 2015-2019 рр., тис. т [8]

Види діяльності	2015	2016	2017	2018	2019
Добича	131,05	126,75	135,30	135,35	146,58
Транспортування	1520,37	1564,34	1648,55	1683,16	1677,52
Підземне зберігання газу	17,38	20,57	22,34	23,69	21,17
Перероблення	161,08	160,14	137,18	141,45	144,62
Інші види діяльності	6,55	7,30	7,70	7,76	8,34

Діяльність Групи Нафтогаз включає низку виробничих процесів [10], що супроводжуються постійним впливом на довкілля, а саме: проведення геологічних досліджень та пошуково-розвідувальних робіт; розробку нафтогазових родовищ; транспортування вуглеводнів магістральними та промисловими трубопроводами; зберігання нафти; облаштування й експлуатацію підземних сховищ газу; підготовку та переробку вуглеводневої сировини; постачання природного і скрапленого нафтового газу промисловим споживачам та комунально-побутовому сектору; експлуатацію автомобільних газонаповнювальних компресорних станцій, тощо.

Основними екологічними аспектами діяльності Групи Нафтогаз та підприємств, що знаходяться у її корпоративному управлінні [10], є: викиди забруднюючих речовин та парникових газів в атмосферне повітря; споживання води; утворення відходів; аварійні викиди або розливи забруднюючих речовин.

Структура викидів забруднюючих речовин та парникових газів в атмосферне повітря без діоксиду вуглецю ( $\text{CO}_2$ ) та з урахуванням діоксиду вуглецю наведена рис. 1.1. Внесок АТ «Укртрансгаз» у загальні викиди Групи Нафтогаз та у відповідне забруднення атмосферного повітря є найбільш суттєвим, рис. 1.2 [10], що підтверджує результати ПАТ «Газпром» [8] (табл. 1.1).

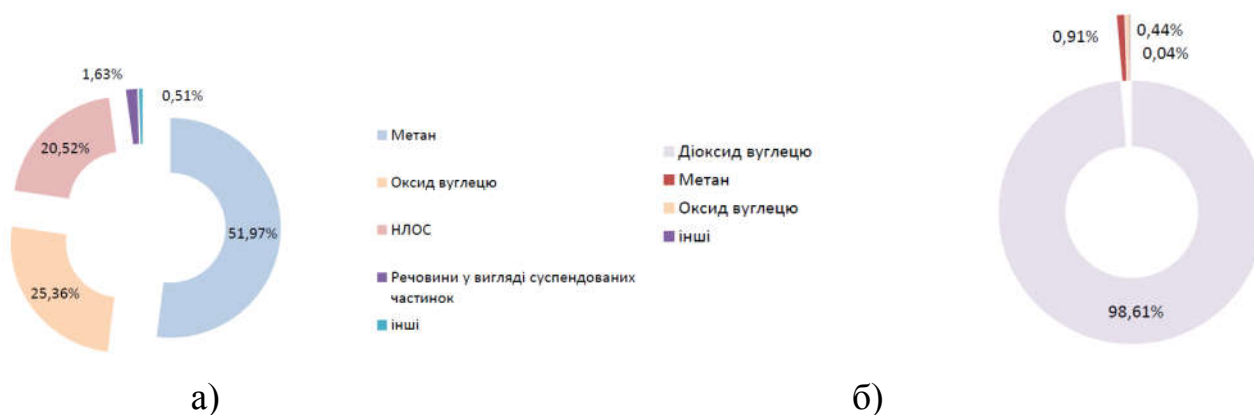


Рисунок 1.1 - Структура викидів забруднюючих речовин та парникових газів в атмосферне повітря: а) без діоксиду вуглецю; б) з урахуванням діоксиду вуглецю [10]

Серед відходів, що утворюються на підприємствах Групи Нафтогаз найпоширенішими є: відходи буріння (вибурена порода, відпрацьовані бурові розчини та стічні води); відходи комунальні змішані; нафтопродукти та нафтошлами; брухт

чорних металів; шини автомобільні, відпрацьовані та пошкоджені; відходи будівництва рис. 1.3 [10]. Окремі підприємства Групи Нафтогаз володіють відповідною дозвільною документацією та обладнанням для утилізації небезпечних відходів на власних об'єктах, в тому числі на КС. Але в цілому внесок підприємств АТ Укртрансгаз в утворення відходів становить 1-2 %.

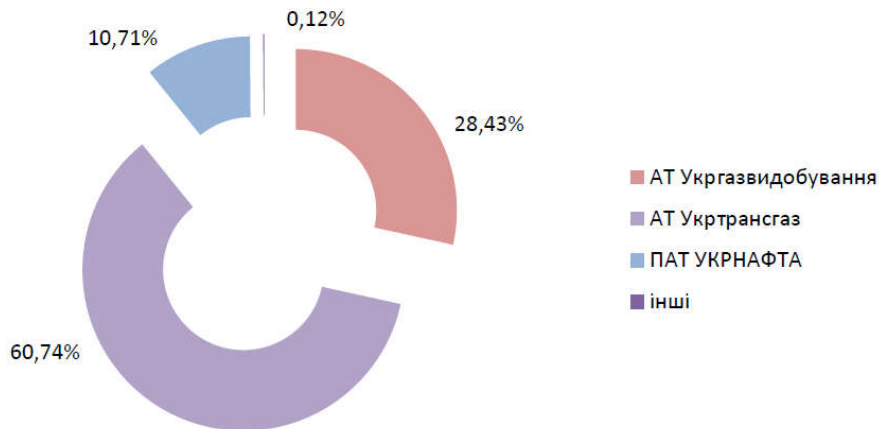


Рисунок 1.2 - Внесок підприємств Групи Нафтогаз у забруднення атмосферного повітря [10]

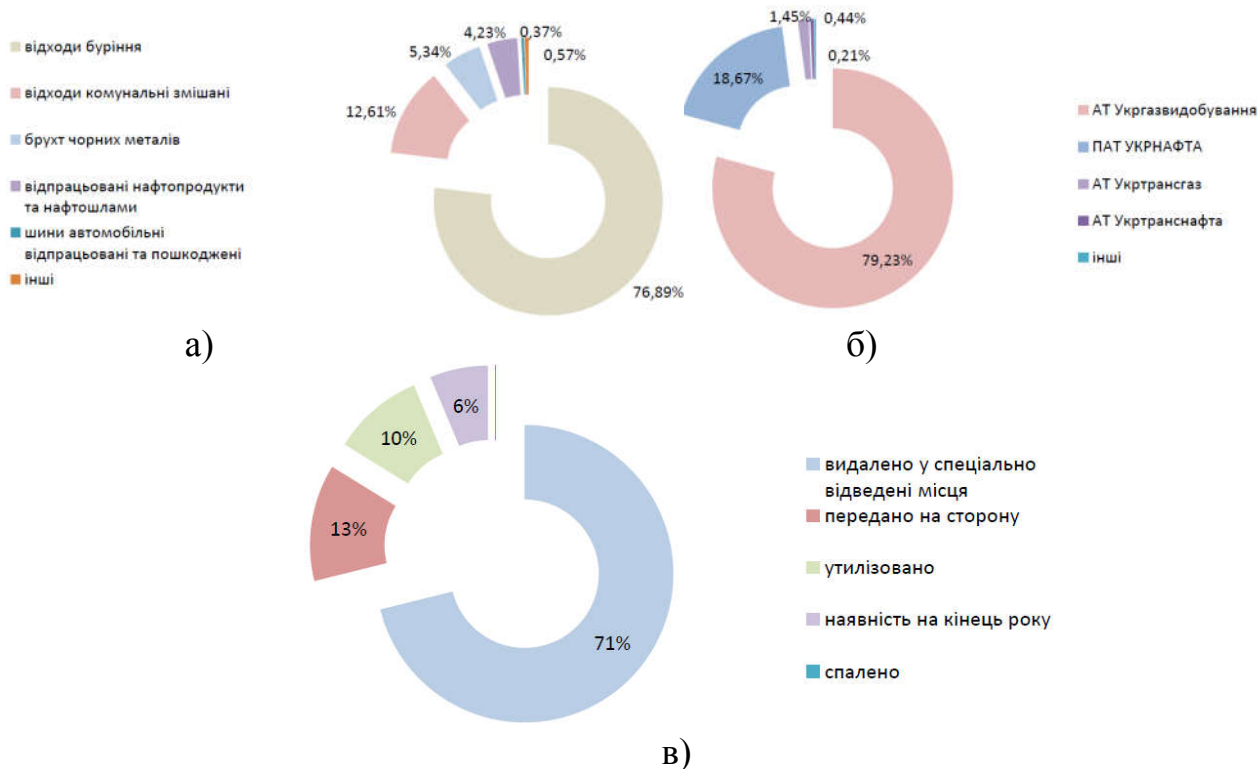


Рисунок 1.3 - Структура відходів, що утворюються на підприємствах Групи Нафтогаз [10]: а) групи відходів; б) утворювачі відходів; в) поводження з відходами

Під час транспортування газу найбільш істотними джерелами забруднення біосфери є компресорні станції. Сучасна компресорна станція (КС) – це складний інженерний комплекс, який забезпечує основні технологічні процеси з підготовки та транспортування природного газу. Компресорна станція як невід’ємна складова ГТС, що забезпечує транспортування газу за допомогою енергетичного обладнання, виступає керуючим елементом у комплексі споруд, які входять до магістрального газопроводу. Саме параметрами роботи КС визначається режим роботи газопроводу. На рис. 1.4 наведена схема лінійної компресорної станції.

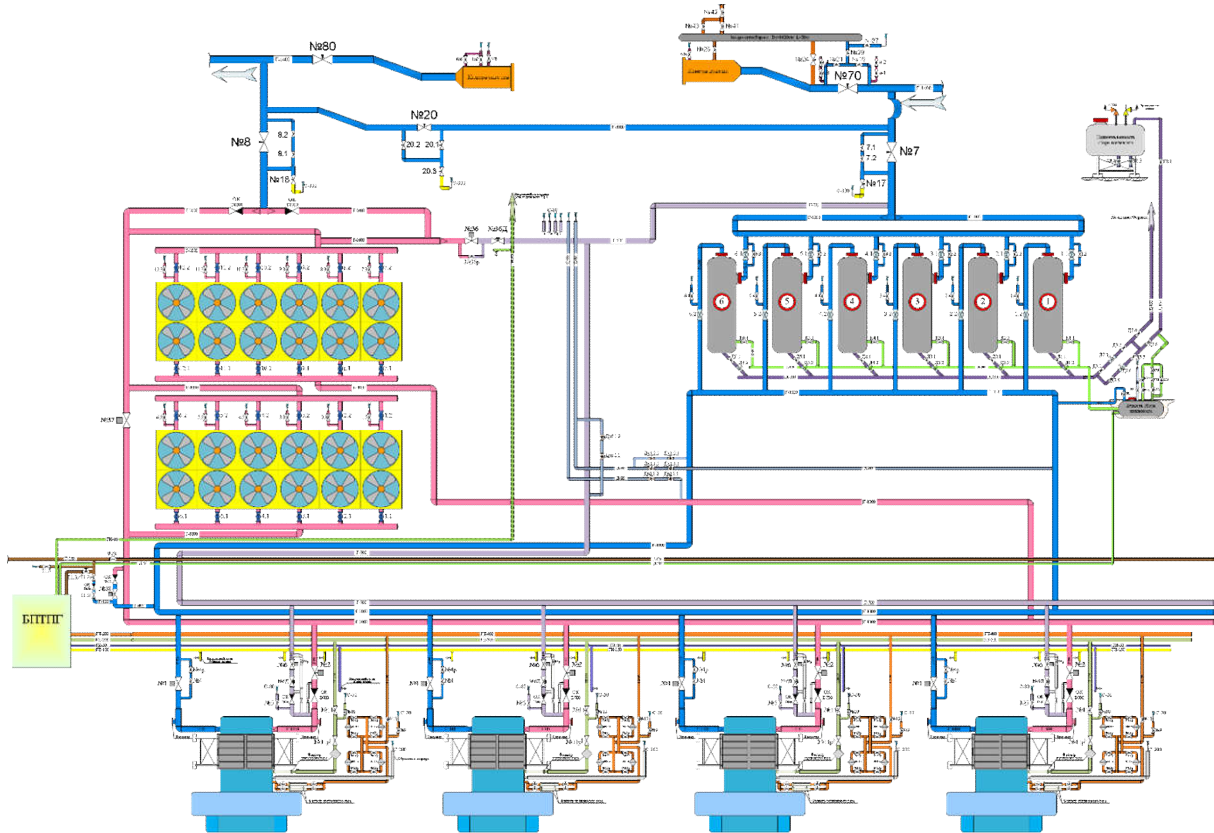


Рисунок 1.4 - Схема лінійної компресорної станції

Газотурбінний привід як основний вид енергоприводу КС за потужністю в даний час розподіляється наступним чином: стаціонарні газотурбінні установки (ГТУ) - 69,3%; ГТУ авіаційного типу - 23,9%; привід від судових ГТУ - 6,8%. Вид приводу на КС в основному визначається пропускною спроможністю газопроводу. Для газопроводів невеликої пропускної спроможності (менше 20—30 млн. м<sup>3</sup>/добу) на КС доцільно використовувати поршневі газомотокомпресори, для газопроводів з пропускною спроможністю 20-30 млн. м<sup>3</sup>/добу найефективнішими засобами приводу нагнітачів є ГТУ та електродвигуни.

Для компресорних станцій магістральних газопроводів розроблені компресорні установки з різною потужністю (в кВт) приводу: 4000, 6000, 10000, 12000 (для електропривідних газоперекачуючих агрегатів - ГПА), 16000, 25000 і 32000. Нормальна потужність ряду для КС визначається кількома параметрами і перш за все тиском газу, який транспортується, діаметром газопроводу, співвідношенням з тиском стискання в газопроводі за КС. Можливість одиничних агрегатів пов'язана з приведеними даними параметрів приблизно такою залежністю: для газопроводів діаметром 720-1020 мм з робочим тиском газу на виході КС 5,5 МПа використовуються агрегати потужністю 4-6 МВт; для газопровідних діаметром 1220 мм з тиском 5,5 МПа - агрегати потужністю 6-10 МВт; при тому же діаметрі, але з тиском газу 7,5 МПа - агрегати потужністю 10 МВт; при діаметрі газопроводу 1420 мм і тиску 7,5 МПа - агрегати потужністю 16 і 25 МВт. При проектуванні та експлуатації стискання для газопровідних КС вибирають у діапазоні 1,3 -1,6.

Газотурбінні установки за порівнянням, наприклад, з газомотокомпресорами мають більш просту конструкцію, дозволяючи значно концентрувати потужність в одному агрегаті, відносно прості, повністю врівноважені, добре піддаються автоматизації, мають малий питому вагу на одиницю потужності та відносно невеликі загальні розміри. Типовий газоперекачувальний агрегат показаний на рис. 1.5.

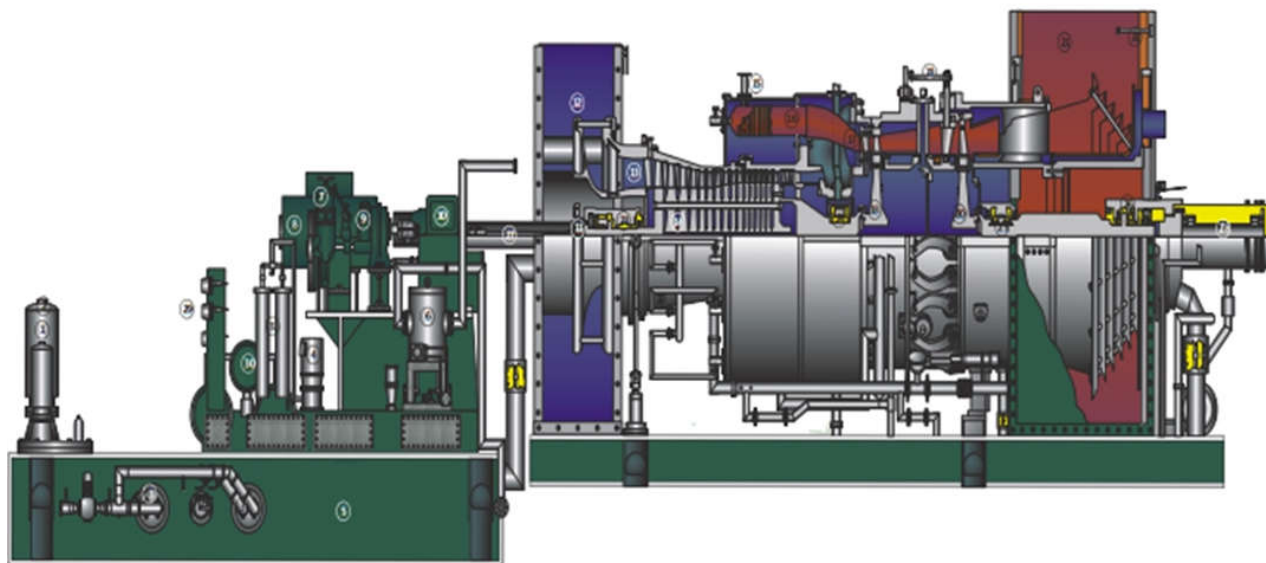


Рисунок 1.5 - Газоперекачувальний агрегат ГТК-25И

Основні недоліки сучасних ГТУ - їх низька економічність (ККД не більш 26 -35%) та сильний вплив перемінного режиму роботи на ККД ГТУ, і тим чином, і на розподіл газу на потреби КС. Газотурбінні установки за порівнянням з електроприводом - це автономний вид приводу КС, які працюють на тому ж паливі, яке й перекачують.

Чинні звіти вказують, що рівні шуму, пов'язані з розробкою та транспортуванням природного газу, включаючи рух вантажних автомобілів, конструкцію колодязів та гідророзрив пласта, ймовірно, будуть вищими за 55 дБА еквівалентного рівня звуку [11-13], – цей ліміт для шуму довкілля рекомендує Американське агентство із охорони навколишнього середовища для запобігання роздратування населення та перешкодам їх діяльності [14]. Хоча підвищений рівень шуму пов'язаний як з розробкою природного газу, так і з його виробництвом, вплив шуму, пов'язаний з процесом розробки, є тимчасовим. Навпаки, акустичне опромінення, пов'язане з видобутком та доставкою природного газу, може бути тривалим, впливаючи на громади, що мешкають та виконують яку-небудь діяльність поруч, протягом доволі тривалого періоду часу. Наприклад, КС є постійними діючими підприємствами, де активно діє виробництво, і шум, що виникає від її споруд та обладнання, буде мати вплив на громади, в тому числі й протягом наступних десятиліть [15, 16]. Проте існує обмежена інформація щодо впливу шуму, пов'язаного з КС транспортування природного газу, зокрема стосовно їх впливу на прилеглі громади.

Вплив КС, як небезпечних об'єктів для навколишнього середовища, наведено у дослідженнях 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. Сєдих, Е.Д. Виноградова, І.М. Карпа, Я.М. Семчука та ін. Незважаючи на те, що на частку природних джерел забруднення повітря припадає понад 50% сполук сірки, близько 93 % оксидів азоту, значна частка оксиду вуглецю й інших ЗР, однак найбільшу небезпеку становлять штучні джерела забруднення повітря, які пов'язані з діяльністю людини, насамперед ті, що застосовують процеси згорання палива. На відміну від природних, штучні джерела



забруднення вирізняються нерівномірністю розподілу особливо між сільськими та міськими територіями. Великим містам притаманний більш високий вміст забруднюючих речовин у повітрі.

До основних чинників впливу магістрального газопроводу на навколишнє середовище можна віднести: хімічне забруднення атмосфери (великий перелік токсичних ЗР 1-4 класів небезпеки); хімічне забруднення поверхневих та підземних вод; фізичний вплив об'єктів газопроводу (шумове, світлове, електромагнітне та вібраційне випромінювання); утворення відходів (включаючи наявність радіологічних матеріалів) при різних видобувних, експлуатаційних та ремонтних роботах на об'єктах газопроводу.

В цьому переліку можна виділити основні негативні впливи від роботи КС на навколишнє середовище – це викиди в атмосферу ЗР, які є у продуктах згоряння палива ГТУ та іншого обладнання станцій, та шумове забруднення атмосферного повітря, в першу чергу від діяльності газоперекачувальних агрегатів (ГПА).

Система магістрального транспорту газу обладнана великою кількістю ГПА (КС розміщуються на ділянках магістралі 100-150 км). Аналізуючи діяльність ГТС держави у цілому, відзначимо, що основним споживачем паливно-енергетичних ресурсів в галузі є процеси транспортування газу. Практика екологічної експертизи джерел викиду вихлопних газів ГПА в КС магістральних газопроводів показує, що основними компонентами шкідливих викидів є оксиди азоту. Реальна небезпека оксидів азоту в тих концентраціях, в яких вони виявляються в атмосфері району розташування КС, пов'язані з їх активністю в фотохімічних реакціях, які безпосередньо негативний вплив на людину і рослинність. Таким чином, основна увага при розгляді заходів щодо збільшення екологічної безпеки роботи КС повинна бути звернена на зниження викидів оксидів азоту. У табл. 1.2 приведені показники викидів оксидів азоту та вуглецю основних типів ГТУ, які використовують на КС, тобто сучасні ГПА є доволі потужними стаціонарними джерелами викиду ЗР в атмосферне повітря, які, як правило, потребують впровадження системи захисту населення від впливу хімічного забруднення повітря. Особливості розвитку газопровідного транспорту зумовили високу концентрацію потужних ГПА на

невеликих площах, що додатково ускладнює екологічну обстановку в районах розташування КС магістральних газопроводів.

Таблиця 1.2 - Показники викидів оксидів азоту та вуглецю з продуктами згорання для ряду газотурбінних установок, які експлуатуються на газопроводах

Тип ГТУ	Витрата продуктів згорання, м <sup>3</sup> /с	Потужність викидів, NO <sub>x</sub> , г/с	Концентрація, NO <sub>x</sub> , мг/м <sup>3</sup>	Потужність викидів, CO, г/с	Концентрація, CO, мг/м <sup>3</sup>
ГТ-700-5	35,4	6,89	200	1,72	50
ГТК-5	35,4	6,89	200	1,72	50
ГТ-6-750	37,1	3,57	100	5,35	150
ГТК-6	37,1	3,57	100	5,35	150
ГТ-750-6	45,6	15,5	350	2,66	60
ГПА-Ц-6.3	47,1	3,04	70	6,52	150
ГПУ-6	23,3	2,41	109	5,18	234
ГПА-Ц-8	47,8	4,83	110	6,58	150
ГПУ-10	68,1	4,3	70	1,84	30
ГПН-10И	40,6	7,68	200	1,92	50
ГТНР-10	66,6	11,7	180	1,95	30
ГТК-16	79,2	7,57	100	1,51	20
ГТН-16	67,4	11,6	180	12,9	200
ГТН-16М-1	66,6	6,88	108	13,8	217
ГПА-Ц-16	80,5	7,73	100	30,9	400
ГПУ-16	76,2	6,4	88	0,73	10
ГТН-25	117,3	13,3	120	39,2	350

Слід підкреслити, що вирішення цієї проблеми набуває дедалі більшого соціального та економічного значення. За результатами інвентаризації загальна кількість джерел викидів ЗР в атмосферу на території КС "Золотоноша" - 54, в тому числі організованих 53, неорганізованих - 1. В атмосферне повітря виділяється 12 забруднюючих речовин в кількості +3528,66 т/рік: азоту діоксид, азоту оксид, вуглець чорний (сажа або зважені частки різного розміру), сірки діоксид, сірководень, вуглецю оксид, метан, бенз(а)пірен, формальдегід, гас, пари оливи мінеральної нафтової, вуглеводні граничні C12-C19. В останні роки великої ваги набула емісія зважених часток через їх небезпеку для здоров'я населення. В цілому робота КС супроводжується викидом в атмосферу ЗР понад 20 найменувань, серед них такі, що утворюють 4 групи речовин, які мають ефект сумації шкідливого впливу (на людину), такі як: сірководень + формальдегід, сірки діоксид + сірководень, азоту діоксид + сірки діоксид.

Викиди продуктів згорання (вихлопних газів) газотурбінних установок відбуваються постійно під час роботи ГПА і здійснюються через вихлопні труби (або шахти викиду газів, що відпрацювали в ГТУ). В опалювальний період постійні викиди продуктів згорання відбуваються також при роботі опалювальних агрегатів АВГМ, призначених для обігріву індивідуального укриття ГПА в холодний період року. Для кожного ГПА встановлюється один опалювальний агрегат. У викидах роботи опалювальних агрегатів присутні оксиди азоту, оксид вуглецю і бенз(а)пірен.

Викиди ЗР в атмосферу, від роботи обладнання КС, можна розбити на 3 групи:

- 1) викиди природного газу (його основного компоненту - метану);
- 2) викиди продуктів згорання природного газу та інших видів палив;
- 3) викиди інших забруднюючих речовин (пари метанолу, мінеральних олів і палив; одоранту; абразивного і металевого пилу і ін.).

Результати багаторічних досліджень на компресорних станціях та їх подальше статистичне оброблення [17] свідчать про те, що найбільші обсяги ЗР протягом року на всіх КС спричиняють продукти згорання природного газу: оксид вуглецю – 53 %, оксиди азоту – 24,5 % (діоксид та оксид азоту). Другим за величиною річних викидів є природний газ (метан + суміш природних меркаптанів (одорант)) – 22,3 %. Всі інші ЗР від допоміжного обладнання складають незначну частку викидів – 0,2. Під час роботи КС в штатному режимі найбільший вплив на навколишнє середовище спостерігається від викидів продуктів згорання палива в ГТУ ГПА. На їх частку припадає за обсягом 98-99% всіх валових викидів в атмосферу від стаціонарних джерел КС. Основні ЗР, що викидаються в атмосферу джерелами КС наведені в табл. 1.3.

Згорання палива є основним джерелом надходження оксиду азоту (NO) і діоксиду азоту (NO<sub>2</sub>) в атмосферне повітря. Забруднення атмосфери оксидами азоту призводить до передчасного руйнування машин, матеріалів покриття, завдає шкоди рослинам і зменшує прозорість атмосфери. Для сучасних міст NO<sub>2</sub> часто відіграє домінуючу роль, порівняно з іншими забруднювачами. Під час визначення допустимих концентрацій оксидів азоту потрібно враховувати не тільки їхній вплив на організм людини та довкілля, а й на зменшення видимості та фотохімічних

реакцій в атмосфері. Вважається, що оксиди азоту в атмосферному повітрі представлені здебільшого  $\text{NO}_2$  (до 80 %). Токсичність  $\text{NO}_2$  проявляється у подразнюючій дії на слизисту оболонку очей та дихальних шляхів, зменшення кисневого постачання організму, порушення дихальних функцій та діяльності центральної нервової системи людини. Проникаючи в легені,  $\text{NO}$  спричиняє їх пошкодження та набряк.

Екологічна проблема від викидів ЗР поглиблюється ще й тим, що деякі з них можуть тривало знаходитись в атмосфері без перетворення: діоксид вуглецю – 5-10 років; оксиди азоту – 2,5-4 роки; оксид вуглецю – 0,2-0,5 роки; метан – 4-7 років [18]. Ці речовини призводять до утворення таких негативних явищ у довкіллі як кислотні дощі, парниковий ефект, а також руйнування озонового шару атмосфери.

Таблиця 1.3 - Перелік основних забруднюючих речовин, що викидаються в атмосферу від джерел КС

Назва речовини	Критерій	Значення, $\text{мг/м}^3$	Клас небезпеки
Свинець і його неорганічні сполуки	ГДК м/р	0,00100	1
Марганець і його сполуки	ГДК м/р	0,01000	2
Діоксид азоту	ГДК м/р	0,08500	2
Фториди газоподібні	ГДК м/р	0,02000	2
Оксид заліза	ГДК м/р	0,04000	3
Оксид азоту	ГДК м/р	0,40000	3
Сажа	ГДК м/р	0,15000	3
Сірки діоксид	ГДК м/р	0,50000	3
Спирт метиловий	ГДК м/р	1,00000	3
Вуглецю оксид	ГДК м/р	5,00000	4
Бензин нафтовий	ГДК м/р	5,00000	4
Кремнію діоксид	ОБРВ	0,02000	0
Метан	ОБРВ	50,00000	0
Одарант-СПМ	ОБРВ	0,00005	0
Пил абразивний	ОБРВ	0,04000	0
Пил дерев'яний	ОБРВ	0,10000	0

Оксид вуглецю – також високотоксична речовина, він становить близько половини від загальної кількості ЗР, які надходять до повітряного басейну міст. Вже за концентрації  $\text{CO}$  в повітрі порядку 0,01- 0,02 % об'єму під час вдихання виникає отруєння людини, а концентрація 0,2 % об'єму ( $2,4 \text{ мг/м}^3$ ) через 30 хв. призводить до запаморочення [18].

Найбільший вплив на навколишнє середовище чинить експлуатація на КС газотурбінних приводів, оскільки на паливний газ таких агрегатів доводиться до 80% і навіть більше від загальної витрати на власні технологічні потреби. Надходження ЗР в атмосферу відбувається при пуску, в період експлуатації і при зупинці ГПА. При пуску ГПА має місце короткочасний залповий викид природного газу в атмосферу зі свічки турбодетандера (пусковий газ, який використовується на роботу турбодетандера і продування контуру нагнітача). Таким чином, основні ЗР, що утворюються в процесі компримування газу, можна звести до наступних джерел викиду, таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 - Джерела викиду ЗР в процесі компримування газу

Устаткування	Джерело викиду	Речовини
ГПА	Вихлопна труба	Діоксид азоту NO <sub>2</sub> , оксид азоту NO, оксид вуглецю CO, метан CH <sub>4</sub>
	Свічка турбодетандера	Метан, сірководень H <sub>2</sub> S, одорант
	Свічка бака з оливою	оливи мінеральні (пари)
Дегазатор оливи	Свічка скид дегазатора	Метан, сірководень, одорант, оливи мінеральні (пари)
Газопровід «малого контуру»	Свічка стравлювання	Метан, сірководень, одорант

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 [17]. До них відносяться оксиди азоту, оксиди вуглецю, вуглеводні, в тому числі бенз(а)пірен та зважені частки різної дисперсності, і інші речовини. ЗР при роботі ГПА також надходять в атмосферу з дегазатора оливи системи ущільнення нагнітача. У дегазатора відбувається мимовільне виділення метану та інших вуглеводнів, розчинених в оливі, які надходять із системи ущільнення валу нагнітача, за рахунок різниці тиску в нагнітачі (до 75 атм) і дегазаторі, що знаходиться під атмосферним тиском. Від баків з оливою ГТУ і нагнітачів, в яких циркулюють нагріті в ГТУ і нагнітачі оливи, через видалення повітря нагнітача виділяються в атмосферне повітря пари оливи.

При зупинці ГПА проводиться так зване розвантаження «малого контуру», тобто відбувається викид в атмосферу газу з ділянок газопроводів, що примикають до нагнітача, через свічку «малого контуру» (стравлювання газу з контуру нагнітача). Через свічку пуску газ в атмосферу викидається епізодично, в залежності від режиму роботи об'єктів компресорного цеху і часу роботи агрегату [19].

Окрім впливу шкідливих речовин, які потрапляють в атмосферу, розташування КС як правило робиться з їх прив'язкою до інфраструктури населених пунктів, тобто до джерел водопостачання та електропостачання, з урахуванням під'їзних доріг, тощо. Інтенсивне будівництво нових газотранспортних підприємств в газовій промисловості та швидке збільшення мережі газопроводів, які вже проходять поблизу населених пунктів, призвели до того, що шум від акустичних джерел компресорних станцій став представляти серйозну екологічну проблему.

До 90% парку експлуатованих ГПА не відповідають вимогам санітарних норм по шуму, який гнітюче діє на обслуговуючий персонал КС і жителів прилеглих районів, які втрачають в результаті цього здоров'я і працездатність. Основним джерелом шуму газотранспортних підприємств є технологічне обладнання транспортування газу (очистка, компримування, охолодження газу), установки допоміжного призначення, що забезпечують електроводопостачання, оливопостачання, вентиляцію та опалення службових приміщень і т.д. [20]. Шум технологічного обладнання КС має високий рівень і досягає 128 дБА в безпосередній близькості від джерела шуму (1 м від звукоактивної поверхні), 95 дБА у виробничих приміщеннях і 92 дБА на території [21].

Модульне компонування КС передбачає охолодження газу в індивідуальних апаратах повітряного охолодження (АПО). Як впливає з матеріалів регламенту СТО Газпром 2-2.1-127-2007 [22], домінуючими джерелами КС, що створюють шумові умови на оточуючій території, є джерела шуму основного технологічного обладнання КС: ГПА і АПО. Ці джерела шуму працюють безперервно протягом року. Крім зазначених джерел на КС періодично здійснюються планові технологічні скиди газу через свічки, пов'язані у більшості випадків з необхідністю проведення планових ревізій і ремонтних робіт. Ці викиди, особливо у початковий період

скидання, відбуваються з високими швидкостями витоку газу і супроводжуються значним утворенням звукової енергії. Початковий рівень звуку потужності випромінювання шуму, що генерується при скидах газу, становить 175-180 дБА, а відповідні їм рівні звуку на відстані 50 м перевищують больовий поріг (135 дБА). Такі викиди здійснюються тільки у денний час і носять залповий характер. За характером випромінюваного шуму свічки скидання газу відносяться до непостійних джерел шуму. З метою зниження рівня звукової потужності таких джерел, на багатьох з них встановлюються шумопоглиначі.

Компресорні станції є джерелом інтенсивного шуму, який поширюється як в приміщеннях і на території самої КС, так і на території найближчої до неї житлової забудови. Високим рівнем шуму характеризуються [23]: ГПА; блоки редукування; системи вентиляції; системи технологічного скидання газу; АПО. Допустимий максимальний рівень шуму на межі санітарної захисної зони в 60 дБА досягається на відстанях в десятки кілометрів від місця скидання [24].

Встановлено, що найбільш високі рівні шуму мають місце на КС з газотурбінним приводом. На КС з газотурбінним приводом основними джерелами шуму є ГТУ і нагнітачі, зокрема, такі їх елементи, як шахта всмоктування повітря, корпус газотурбінного агрегату, шахта витоку газів (вихлопу) ГТУ, нагнітач, технологічна обв'язка трубопроводів відцентрових нагнітачів, системи вентиляції. Виявлено залежності умов шуму на виробничому майданчику та у довкіллі від рівня звукової потужності ГПА, встановленої потужності ГТУ, звукової потужності турбокомпресора, терміну служби ГПА, кількості одночасно працюючих ГПА, характеристик виробничих приміщень, конструктивного виконання ГПА, стану засобів поглинання шуму ГПА [25]. У ГТУ компресорних станцій ГТС інтенсивний шум виникає в системах всмоктування повітря і вихлопу газів, у вентиляторі системи охолодження, в корпусі турбомашини і в генераторі. Шум, що створюється в процесі всмоктування повітря в компресор, обумовлений взаємодією турбулізованого ротором компресора повітря зі статором, а саме змінними аеродинамічними силами, а також явищами нестійкості турбулентного потоку. В принципі шуму ГТУ КС є дуже подібним до шуму турбореактивних двигунів

літаків, тому моделі, що створені для їх обчислення, можуть бути застосовані і для обчислення рівнів звуку шуму ГТУ.

Процес всмоктування ГТУ викликає шум, що характеризується рівнями звукового тиску 90-100 дБ, максимум випромінювання має місце на частотах 1000-4000 Гц [25]. Шум шахти вихлопу має максимум випромінювання в діапазоні частот 500-1000 Гц. Рівні шуму вихлопу на відстані 10 м від шахти оцінюються в межах 80-90 дБ. Нагнітачі випромінюють шум високого рівня 90-100 дБ з максимумом випромінювання в діапазоні 1000-2000 Гц. ГТУ є також яскраво вираженими джерелами інфразвуку, який завжди маскується в загальному шумовому фоні.

Аеродинамічний шум компресора поділяють на два види: вихровий і сиренний. Основна частота вихрового шуму відповідає швидкості обертання ротора [25]. Для промислових газових турбін вона коливається в межах 50-160 Гц. Частота, відповідна числу лопаток  $z$  і числу обертів ротора за секунду  $n$ ,  $(zn/60)$  – основна частота сиренного шуму. Для газових турбін вона становить 1000-5000 Гц. Сиренний шум є найбільш шкідливим за впливом на людину. Інтенсивність його залежить від тиску в проточній частині компресора, числа лопаток ротора та статора, швидкості обертання. Інтенсивність сиренного шуму пропорційна також до окружної швидкості ротора в ступені «3».

Шум, що утворюється на вихлопі з ГТУ, викликаний процесом горіння палива в камері згорання, високою швидкістю проходження газів через проточну частину турбіни і турбулентністю газового потоку на вихлопі, що є головною складовою шуму. Відомо, що він значно послаблюється при зменшенні середньої швидкості вихлопних газів і нерівномірності швидкостей в секціях вихлопного патрубку. Крім того, за своєю фізіологічною дією шум на вихлопі газових турбін є менш шкідливим, ніж шум на всмоктуванні повітря компресором. Серйозну проблему шум вихлопу може явити при виникненні газодинамічних коливань в теплообмінниках, які найчастіше встановлюються у вихлопному тракті для утилізації тепла. Шум, створюваний корпусами ГТУ, є наслідком турбулентності потоку повітря і газів в зоні горіння в трубопроводах і визначається розмірами корпусів, їх жорсткістю. Велика розмаїтість існуючих типів ГТУ ускладнює



визначення значень рівня шуму, створюваного корпусами. Можна лише відзначити, що рівень звукової потужності зростає зі збільшенням розмірів газової турбіни. У табл. 1.5 наведені октавні рівні звукової потужності, випромінюваної агрегатами ГТУ в машинний зал.

Таблиця 1.5 - Рівні звукової потужності, випромінюваної ГТУ в машинному залі (дБ) [26]

Тип ГТУ	Середньо-геометрична частота октавної смуги, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
ГТ-700-12М	113	112	109	100	112	117	120	115
ГТ-25-700	112	108	101	103	105	113	110	107
ГТ-50-800	118	119	109	108	113	120	120	116
ГТ-100-750	117	120	по	111	112	118	118	117

Результати санітарно-технічної паспортизації та атестації робочих місць за умовами праці показують, що найбільш несприятливим виробничим фактором, що впливає на персонал газотранспортних підприємств, є наявність високих рівнів шуму в зонах обслуговування технологічного обладнання; 15,8% працівників підприємств працюють в умовах підвищеного шуму, а розміри СЗЗ по критеріям впливу шуму можуть досягати 6 км [21]. В роботі [27] стверджується, що наявність високих рівнів шуму в зонах обслуговування технологічного обладнання КС зумовлює 81% працівників підприємств працюють в умовах підвищеного шуму, крім того, КС іноді розташовані в густо населених районах і ці підприємства є джерелом шумового забруднення цих територій.

Завдання зниження виробничих шумів на об'єктах газової промисловості обумовлена збільшенням потужності газоперекачувальних агрегатів і технологічного обладнання, будівництвом нових компресорних станцій і нарощуванням цехів з перекачування газу при реконструкції. Акустичні обстеження об'єктів ГТС показують, що на тлі поліпшення шумових характеристик основних джерел шуму - ГПА - істотним, а іноді і домінуючим стає внесок допоміжного обладнання (апарати повітряного охолодження газу, запірні апаратура, системи газоповітряних скидів та ін.) у шумове поле КС. На більшості КС рівні шуму

перевищують гранично допустимі значення. Основною причиною виникнення вібрації і шуму в цьому випадку є турбулентність і вихровий характер перебігу газу в трубопроводах, регуляторах тиску і клапанах. До числа основних джерел шуму, що визначають шумовий режим на промисловому майданчику КС і прилеглий до неї території, відносяться ГПА, системи технологічних скидів газу з контурів нагнітача, паливного та пускового газу ГПА, а також лінійних частин КС.

Зокрема в роботі [28] наводяться дані вимірювання шуму в денний та нічний періоди доби, які вказують, що на межі безпекової зони 700 м спостерігається перевищення і максимального рівня звуку і еквівалентного, табл. 1.6. Отримані дані вказують на те, що проживання поблизу КС природного газу може потенційно призвести до великого впливу навколишнього шуму. У цьому дослідженні [28] спостерігали рівень шуму в приміщеннях ( $L_{eq}$ , протягом 24 год) для будинків, розташованих на відстані  $<300$  м від компресорної станції, був в середньому на 6,9 дБА нижчим, ніж на відкритому повітрі, тоді як для контрольних будинків рівень шуму у приміщенні був на 9,4 дБА нижчим, ніж на відкритому повітрі. Внесок зовнішнього шуму у рівень звуку в приміщенні може змінюватися залежно від типу будинку та від того, чи відкриваються/закриваються вікна [28]. Наприклад, на основі рекомендацій, встановлених Агентством охорони довкілля США, в зоні з холодним кліматом очікується зниження рівня шуму на 17 дБА в будинку із відкритими вікнами та зменшення на 27 дБА при закритих вікнах [28]. На відміну від цього, спостерігалася відносно невелика різниця між РЗ в приміщеннях та зовнішнім шумом поблизу компресорних станцій. Можливі пояснення цієї невеликої різниці включають [28]: 1) моніторинг проводився протягом одного тижня в квітні, коли температури коливались від 1 до 21°C, тому можливо, що в теплі дні вікна та двері відчинялися, а в прохолодніші – зачинялися; 2) РЗ в середині приміщень часто спостерігався вищим в будинках на відстані  $<750$  м.

В Україні РЗ на території житлової забудови або на межі СЗЗ для шуму від обладнання КС вимірюються вкрай рідко. У відомій роботі [29] вказується, що рівні потужності випромінювання звуку для джерел шуму на КС можуть бути 110-128

дБА, а найбільш жорсткі вимоги до РЗ на території житлової забудови (45 дБА) для цих умов обчислюються на відстані 525...1894 м відповідно.

Таблиця 1.6 - Виміряні значення рівнів звуку в середині житлових будинків і на території їх розташування на різних відстанях до компресорної станції [28]

Відстань від КС, м	Закриті будівлі				Відкриті будівлі			
	<300	300-600	>600-750	>1000	<300	300-600	>600-750 <sup>a</sup>	>1000
Кількість вимірювань за 1 хв.	4320	4320	2880	4384	4320	4320	748	4320
Кількість будівель	3	3	2	3	3	3	2	3
Значення $L_{eq24год} (L_{dn})^b$	53,4(61,0)	53,5(59,2)	51,2(57,2)	42,2(47,9)	60,3(66,5)	50,3(56,0)	54,6(62,3)	51,6(57,5)
ССВ <sup>b</sup>	1,2	1,2	1,1	1,1	1,0	1,1	1,1	1,1
$L_{95}^c$	45,9	41,8	41,3	37,9	57,5	46,4	48,8	50,2
Будівлі з $L_{dn, криті} >45$ дБА <sup>d</sup>	3/3	3/3	2/2	2/3	-	-	-	-
Будівлі з $L_{dn, криті} >55$ дБА <sup>e</sup>	-	-	-	-	3/3	2/3	-	2/3

a - кількість вимірювань зменшується через несправність обладнання, таким чином, приведені рівні звуку включають період вибірки, який був менше 24 годин ( $L_{eq}$  це не  $L_{eq24год}$ );  
b - середнє геометричне та стандартне відхилення логарифмічних середніх для  $L_{eq24год}$  і  $L_{dn}$  (виявились однаковими);  
c - рівень перевищувався протягом 95% часу і представляє рівень фону;  
d - рекомендовані обмеження шуму в приміщенні, щоб запобігти перешкодам діяльності та дратуванню;  
e - рекомендовані обмеження шуму зовні приміщення, щоб запобігти перешкодам діяльності та дратуванню.

Для підтвердження цих висновків та оцінки можливого впливу на здоров'я та заходів захисту людини необхідні додаткові дослідження. Але загальні вимоги захисту від шуму, як на робочому місці, так і в довіллі, є наступними [20, 23]:

- еквівалентний РЗ на місцях працюючих протягом регламентного обслуговування ГПА не повинен перевищувати 80 дБА за робочу зміну (восьмигодинний робочий день);
- дотримання допустимих РЗТ в октавних смугах частот і РЗ в робочих зонах на території КС відповідно до ГОСТ 12.1.003 з урахуванням одночасної роботи декількох ГПА і іншого обладнання КС;
- дотримання допустимих РЗТ в октавних смугах частот і РЗ на відстані 700 м від огорожі КС з урахуванням одночасної роботи декількох ГПА та іншого обладнання КС відповідно до [30];

- повинні бути передбачені глушники для захисту від шуму свічок пускового газу і продувочної свічки контуру нагнітача.

Рівень фізичного впливу також враховують при встановленні розмірів СЗЗ. Визначення РЗ розрахунковим методом здійснюють на підставі технічної характеристики устаткування, умов його розміщення, характеристик і режиму роботи, рівнів звукової потужності і звукового тиску випромінювання в октавних смугах частот. Шумові характеристики обладнання і машин встановлюють на підставі паспортних даних заводу-виготовлювача, або за каталогом СТО Газпром 2-3.5-041 [31], інших технічних документів. Розрахунок шумового впливу (акустичний розрахунок джерел КС) здійснюють для денного і нічного періоду доби. Рівень шуму на території житлових споруд, в середині житлових та громадських будівель повинен відповідати нормативам згідно ДБН В.1.1-31:2013 [30], ГОСТ 27409-97 [32], ГОСТ 12.1.036-81 [33] з реалізацією заходів відповідно до [34, 35].

## **1.2. Забруднення лопаток осьового компресора**

Кількість продуктів згоряння, яке надходить в атмосферу з вихлопними газами від роботи ГТУ на КС, як і шумові характеристики залежать від багатьох чинників, у тому числі від технічних показників самої ГТУ. Власні потреби КС у паливному газі становлять 8–10 % від обсягу газу, що транспортується. Технічні показники осьових компресорів (ОК) залежать від багатьох чинників, які впливають на технічні характеристики ГТУ. Одним з таких чинників є забруднення поверхні лопаточного апарату (ротора та статора) осьового компресора і відповідне зниження ефективності його роботи. У атмосферному повітрі, яке нагнітається для роботи ГТУ, містяться аерозолі – зважені у повітрі тверді і рідкі частки. Концентрація твердих і рідких часток в атмосферному повітрі залежить від умов зовнішнього середовища і значно зростає при наявності несприятливих умов, таких як, пилові й піщані бурі, інтенсивні викиди промислових підприємств і т.п. Технологічними характеристиками атмосферного пилу в першу чергу є [36]: дисперсність;

концентрація в одиниці об'єму; фізичні властивості пилу: щільність, вологість, гігроскопічність, абразивність, здатність до коагуляції і злипання; їх хімічний склад.

Зазвичай КС розташовані на відкритій місцевості де навколо відкрита поверхня ґрунту, яка є основним джерелом природного пилу, а головним чинником його розповсюдження – вітер (концентрація пилу пропорційна швидкості вітру в кубі). Данні наведені в [37] дозволили провести класифікацію природної запиленості атмосферного повітря.

За характером запиленості територію навколо КС можна поділити на 5 зон: зона 0 відповідає районам з трав'яним покривом ґрунту і слабкою середньої ймовірної концентрацією пилу -  $0,1 \text{ мг/м}^3$ ; зоні 1 відповідає слабкій концентрації запиленості – до  $0,5 \text{ мг/м}^3$ ; для зони 2 характерна підвищена концентрація до  $0,7 \text{ мг/м}^3$  концентрація пилу з більш частими пиловими бурями; в зоні 3 спостерігається висока (до  $1,2 \text{ мг/м}^3$ ) концентрація пилу, а зона 4 характеризується інтенсивною середньою концентрацією пилу до  $2,2 \text{ мг/м}^3$  з частими пиловими (піщаними) бурями. Під час пилових бур концентрація пилу в повітрі може значно перевищувати зазначені вище значення за джерелами [38, 39] концентрація пилу на висоті 5-6 м може досягати  $130-150 \text{ мг/м}^3$ . Забрудненість повітря викликають також такі природні аерозолі, як пилок рослин, дрібні комахи, морська сіль і т.п. Натепер діяльність людини сильно впливає на стан навколишнього середовища: викиди від підприємств, електростанцій, обробка сільськогосподарських угідь (обробка ґрунту сільхозтехнікою, гербіцидами, збирання врожаю), наявність розгалуженої мережі транспорту збільшують запиленість повітря. У дисертації Фішера А.В. [38], а також у Калюжного Д.Н. [40] зазначається, що в радіусі 5-8 км від великих електростанцій, металургійних комбінатів, коксохімічних заводів, запиленість атмосфери досягає  $2-4 \text{ мг/м}^3$ . Тобто в промислових районах і поблизу великих міст, запиленість повітря може перевищувати запиленість зони 4.

Запиленість атмосферного повітря, що засмоктується ОК під час роботи ГТУ, як відомо, призводить до забруднення та ерозії лопаток компресора, турбіни і інших елементів [38, 41-45]. Залежно від концентрації вологи і твердих часток стандартом ГОСТ 17433–80 [46] передбачається 14 класів забрудненості. При визначенні точки

роси за мінімальну робочу температуру застосовують найменшу з мінімальних температур стисненого повітря або навколишнього середовища. Для класу 0 і непарних класів наявність рідкої вологи у стисненому повітрі не допускається, а її вміст у пароподібному стані визначається точкою роси. Для забезпечення цих вимог необхідне осушування або підігрівання стисненого повітря. Для парних класів стандартом допускається вміст вологи в рідкому стані, а вміст водяної пари не регламентується. Для цих класів осушування не потрібне. У міжнародних стандартах прийнята система класифікації повітря за ISO-8573-1.

Для захисту ГТУ від пилу на вході в ОК встановлюються повітрязабірники, одним з основних елементів яких є фільтри грубого (як правило інерційні) і тонкого (з нетканих і спеціальних матеріалів) очищення. Технічні вимоги до фільтрів на вході ГТУ в основному продиктовані отриманням на виході з них допустимої залишкової запиленості повітря на вході в лопатковий апарат ОК, що не викликає його ерозії. Для ГТУ нового покоління рекомендується приймати допустиму залишкову запиленість на вході в ОК не більше  $0,35 \text{ мг/м}^3$ , при цьому концентрація зважених часток з розміром понад 10 мкм не повинна перевищувати 5% від загальної маси пилу за фільтром [39].

Навіть за умов такого ступеня очищення, повітряні фільтри, встановлювані на вході в компресор, не в змозі забезпечити захист лопаток компресора від забруднень. Як відзначається в роботі [47], забруднення ОК викликається, в основному, пилинками з умовним діаметром 2 мкм і менше, маса яких становить 80-90% від загальної кількості пилу після фільтра. Зважаючи на це з плином часу відбувається зниження параметрів ОК і ГТУ: витрати повітря, співвідношення тиску та ККД ОК, корисної потужності і ККД ГТУ у цілому.

В роботі [48] пропонується розділяти домішки, присутні у повітрі, яке засмоктує компресор, на зовнішні і внутрішні. До зовнішніх домішок, викликаних зовнішніми по відношенню до ГТУ чинниками, відносяться:

а) природні - пил, пари води, мастил та інших речовин, краплі дощу, солі морської води або солончакових ґрунтів, комахи, пилок рослин, гербіциди і т.п.;

б) промислові та транспортні - хімічні суспензії і пил від промислових підприємств, незгоріле паливо (сажа, дим), міський пил, викиди і пил від транспортних засобів.

До внутрішніх включень відносяться домішки, пов'язані з роботою основного і допоміжного обладнання самої ГТУ:

а) протікання оливи і їх парів з негерметичних роз'ємів підшипників, протікання з оливоущільнень і з негерметичних оливоохолоджувачів, встановлених у всмоктувальному тракті ряду ГТУ;

б) крапельна волога, солі з установок водовипаровувального охолодження на вході в ОК;

в) рециркуляція вихлопних газів на вхід ГТУ і т.п.

Забруднення компресора при роботі ГТУ відбувається у вигляді утворення на лопатках і інших деталях нальотів липкого пилу органічного походження. Налюти на лопатках ОК можуть утворювати також суміші аерозолів пилу і масла, води і т.п., а також солей випаровується води, що потрапляє в з атмосфери або з випарних систем агрегату. Відкладення бруду які утворюються на лопатках збільшують шорсткість поверхні лопаток, змінюють їх аеродинамічну форму. Вплив забруднень на аеродинамічні характеристики профілів лопаток ступенів призводить до зниження ККД, напору і витраті повітря у компресорі в цілому.

Обстеження забруднених проточних частин ОК показує, що в залежності від виду пилу відкладення на лопатках набувають щільну або пухку структуру. У дослідженні [49] зазначені такі основні чинники, від яких залежить забруднення, швидкість росту відкладень на лопатах ОК і їх вплив на зниження характеристик ГТУ через забруднення:

1) Конструкція, розрахункові параметри і режими роботи ГТУ. Наприклад, ГТУ малої потужності (з малим розміром лопаток) більш чутливі до забруднення, ніж ГТУ великої потужності. Тривала робота валу високого тиску на знижених частотах обертання у приводних ГТУ буде викликати підвищений забруднення перших ступенів ОК, Форма вхідного патрубку також впливає на швидкість забруднення ОК. Наявність на вході ОК водовипаровувальних систем охолодження вхідного повітря може призводити до прискорення забруднення лопаток ОК;

2) Місцезнаходження ГТУ і стан навколишнього середовища один з основних факторів, що впливають на забруднення.

3) Загальний план станції і розміщення обладнання. При проектуванні комплексного повітрязабірною очисного пристрою, має бути прийнято до уваги переважний напрямок вітру в даному місці, розташування градирень, вихлопних труб з ГТУ і орієнтація вихлопів з масляних баків для унеможливлення потрапляння випаровування і вихлопних газів на вхід ОК. При неврахування цих факторів вплив забруднення ОК може значно збільшитися.

4) Якість і технічний рівень обслуговування обладнання ГТУ: регулярна перевірка і проведення очистки і заміни повітряних фільтрів, проведення регламентних промивок проточної частини ОК.

5) Атмосферні умови: температура і відносна вологість повітря, особливі стану атмосфери - дощ, туман, смог, наявність потоків, що перемішують повітряну середу.

Ці та інші фактори наведені у роботі [47], де зроблені висновки щодо залежності ступеня та швидкості забруднення лопаток ОК від перерахованих вище факторів та наведені залежності обробки поверхонь лопаток і наявністю покриттів лопаток перших ступенів ОК та їх забруднення. Лопатки без покриттів набагато швидше забруднюються, а після процесу промивання характеристики такого компресор неповністю відновлюються.

Вплив вологості атмосферного повітря на забруднення ОК розглянуто в ряді робіт [48, 50], в яких відзначали збільшення швидкості забруднення лопаток ОК при наявності підвищеної вологості атмосферного повітря. Разом з тим, при наявності надлишкової вологи після проміжного охолоджувача агрегату ГТ-25 зазначалося зниження забрудненості ВНА і першого ступеня КВТ, а максимальні відкладення були зафіксовані на другому ступені КВТ, тобто краплі сконденсованої вологи після охолоджувача змивали частини відкладень. При невисокій вологості атмосферного повітря з'являється невелика кількість крапельної вологи перед ВНА, яка змішуючись з пилом атмосферного повітря буде сприяти утворенню водорозчинних відкладень на лопатках ОК ГТУ. Надалі швидкість відкладень буде збільшуватися,



через що з'являється додаткова шорсткість профілю лопатки. При збільшенні вологості повітря понад певну межу, надмірна волога буде розм'якшувати відкладення і лопатки будуть промиватися, при цьому втрачена потужність ГТУ буде в якійсь мірі відновлюватися.

У разі вуглеводневих відкладень миючий ефект при підвищеній вологості дуже слабкий або взагалі відсутній. Найбільш поширеними є включення, які містять розчинні і нерозчинні домішки. Залежно від їх масового співвідношення, а також від їх відносного положення в шарах відкладень, миючий ефект в широкому діапазоні підвищеної вологості повітря може бути ледь помітним.

Широкі дослідження забруднення ОК в експлуатаційних умовах виконані на енергетичних агрегатах ГТ-25-700-1, ГТ-25-700-2, ГТ-100 ЛМЗ, ГТ-700-12 НЗЛ, АК-10/12, ГТ-35, а також на приводній установці ГТН-9 [50-53]. У цих роботах отриманий змістовний матеріал про склад відкладень на лопатках компресорів та розподіл відкладень за ступенями ОК. Відкладення на лопатках ОК складаються на 27-85% з органічних сполук, 30% яких припадає на екстрагуючі ефірні масла, і мінеральної частини - в основному оксиди і солі Si, Al, Fe, Mg, Ca, а також з'єднання Na, K, S, Pb і інші важкі метали.

Одним з основних питань в дослідженні забруднення ОК є питання про розподіл відкладень вздовж проточної частини і по поверхні робочих і напрямних лопаток компресора і як показали спостереження [52] найбільш сильно забруднюються перші ступені ОК. В роботі [53] були досліджені характер і склад відкладень на лопатках КНТ і КВТ агрегату ГТ-25-1ЛМЗ після 1000 год роботи. Там же відзначається, що основна маса відкладень мала місце на ВНА і на перших чотирьох ступенях компресора. Очевидно, що на випуклих поверхнях лопаток всіх ступенів утворювалося більше відкладень, ніж на увігнутих. Із загальної суми відкладень 83% припадало на лопатки КНТ і 17% на лопатки КВТ. Аналогічні дані про забруднення перших ступенів були отримані при дослідженні ефективності промивання ОК агрегатів ГТ-700-4 і ГТ-700-5 [54], при дослідженні забруднення промисловими відкладеннями після 50 год роботи без очищення проточної частини.

### 1.3. Характеристика існуючих методів очищення ОК ГТУ від забруднень

Осадження експлуатаційних забруднень на поверхнях лопаток та направляючих апаратах ОК ГТУ призводять до зниження ефективної потужності та коефіцієнта корисної дії (ККД) [56]. Зайві витрати паливного газу можуть становити до 3% від оптимальних значень. Для підтримки потужності ГТУ у оптимальних технічних умовах поверхні лопаток та направляючих апаратів ОК ГТУ періодично очищують за допомогою водних розчинів технічних мийних засобів (ТМЗ), таких як: «Синвал», М1, М2, «Прогрес» або твердих органічних частинок кісточкової крихти, рису, твердої пшениці [55].

Проте названі способи очищення мають суттєві недоліки. Так очищення за допомогою промивання виконується тільки під час зупинки ГТУ, і тому може виконуватися тільки у період виконання ремонтних робіт на ГТУ. Очищення за допомогою кісточкової крихти може виконуватися без зупинки ГТУ, але велика кількість дрібного пилу залишається у порожнечах систем охолодження турбін та повторно відкладається на останніх ступенях ОК.

Для підтримки оптимальної роботи ГТУ виконується періодичний контроль за технічними показниками компресора під час роботи ГТУ. Збільшення витрат паливного газу у разі оптимальних атмосферних параметрах навколишнього середовища свідчить про забруднення ОК. У цьому разі потрібно здійснювати технологічну операцію очищення деталей ОК від експлуатаційних забруднень.

Для миття лопаток від експлуатаційних забруднень ГТУ зупиняють, ротор турбіни охолоджують до температури не більше 100°C. Потім у режимі «прокручування», зі швидкістю приблизно 20% від номінальної потужності здійснюють промивання. Миючий розчин подають на лопатки ОК за допомогою форсунок. Як мийну рідину використовують водні розчини різних ТМЗ, наприклад, «Синвал». Водний розчин мийного розчину наносять на поверхню лопаток та направляючих апаратів ОК ГТУ. Миття у режимі «прокручування» пов'язано з тим, що під час миття водними розчинами ТМЗ потрібне їх осадження на поверхні деталей та подальша витримка приблизно 20–30 хв. Після цього здійснюється промивання ОК водою. Продукти очищення, разом з водою, що використовувалась для промивання, видаляються

через дренажні отвори в корпусі ОК. У разі проведення очищення під час режиму роботи ОК ефективність миття суттєво знижується через зменшення площі, на які осідає розчин ТМЗ, а також через зменшення часу взаємодії забруднення з розчином ТМЗ. Система рідинного очищення складається з устаткування для подачі мийного засобу, розподільних колекторів і форсунок. Форсунки встановлюються так, щоб вони не виступали в межі проточної частини і разом з тим рівномірно розподіляли мийний розчин у потоці повітря. Конструкція форсунок повинна виключати можливість потрапляння будь-яких деталей форсунок у проточну частину ОК. Під час роботи ГТУ лопатки ОК поступово забруднюються. Це призводить до зростання температури за турбіною низького тиску (ТНТ) та падінню обертів на турбіні високого тиску. Результати виробничих іспитів миття ОК ГТУ водними розчинами ТМЗ, що проводилися фірмами Nuovo Pignone і ОРМА, свідчать, що під час миття ОК ГТУ площа промивання поверхні лопаток становить не більше 40–50% їх загальної площі для 1–5 ступеня та 20–30% для 6–10 ступеня. Таким чином, такий спосіб миття є недостатньо ефективним.

Спосіб очищення за допомогою твердих органічних частинок більш ефективний порівняно з промиванням водними розчинами ТМЗ. Однак у разі використання такого способу очищення за рахунок інтенсивного руйнування твердих частинок у разі їх зіткнення з поверхнею рухомих деталей ОК ГТУ утворюється велика кількість дрібнодисперсного пилу. Такий пил, середній розмір частинок якого від 0,5 до 5 мкм, осідає на покритих масляною плівкою поверхнях деталей, що ще більше їх забруднює. Крім того, разом з повітрям, яке відбирається з ОК для охолодження вузлів та деталей ГТУ, пил потрапляє в порожнини деталей ГТУ, які охолоджуються повітрям, наприклад, соплових апаратів та перфорованих лопаток, що знижує їх робочі характеристики. У технічних рекомендаціях фірми Nuovo Pignone вказано, що очищення органічними частинками слід проводити після попереднього миття ОК ГТУ водними розчинами ТМЗ, щоб виключити можливе вторинне осідання пилу на поверхню деталей із масляною плівкою. Такий спосіб очищення застосовують поєднуючи з допоміжним миттям ОК ГТУ водними розчинами ТМЗ. Однак оскільки майже всі типи турбін сучасних ГТУ мають велику

номенклатуру деталей з внутрішніми каналами для їх охолодження, очищення з побічним продуктом у вигляді дрібнодисперсного пилу недоцільне.

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

Недоліки зазначених способів очищення потребують пошуку нових більш ефективних методів миття ОК ГТУ. Один із нових способів очищення поверхонь запропонований фірмою GOLD JET Inc. [57], заснований на використанні сухого льоду – твердої форми вуглекислого газу  $\text{CO}_2$ . Температура сухого льоду  $-78,33\text{ C}^\circ$ . Принцип очищення сухим льодом ідентичний піско-струменевому способу. Гранули сухого льоду прискорюються у форсунці за допомогою струменя стислого повітря й вистрелюються на поверхню що очищують. Ефект очищення досягається за рахунок не абразивної дії, а за здатності сухого льоду до сублімації. Під час удару об поверхню гранули миттєво випаровуються, а оскільки об'єм вуглекислого газу перевищує об'єм сухого льоду приблизно у 800 разів, на поверхні відбуваються мікроривбухи, з допомогою яких очищується поверхня. Утворення великої кількості вуглекислого газу під час сублімації сухого льоду в ОК ГТУ можуть призвести до негативного впливу на процес згоряння палива в камері згоряння ГТУ, якщо очищення за таким способом виконується під час роботи ГТУ. Тому використання технології очищення ОК ГТУ сухим льодом під час роботи ГТУ також недоцільне.

Відома технологія очищення поверхонь від забруднення фірми IceBlast [58] за допомогою льоду, отриманим заморожуванням води. Частинки льоду, розігнані струменем стислого повітря, з великою швидкістю зіштовхуються з поверхнею що очищують. Ефект очищення поверхонь від забруднення засновано на трьох фазах, що діють одночасно. Перша фаза – первинний стан (лід), частинки льоду з великою швидкістю та значною обертальною силою атакують забруднення. У тому випадку, якщо обертальна сила частинки більша сили, яка утримує забруднення на поверхні, здійснюється його зміщення. Друга фаза – зміна стану (лід з водою). У момент

зіткнення з поверхнею, що очищається, відбувається деформація частинки льоду за рахунок його кристалічної структури. Деформована частинка продовжує рух, шукаючи виходу своєї кінетичної енергії. Ефект скобління, що виникає внаслідок цього, володіє здатністю до очищення. Третя фаза – кінцевий стан (вода). Вода, яка утворилась від танення льоду, також видаляє забруднення. У разі очищення кристалічним льодом під час зіткнення гранул із твердою поверхню кінетична енергія частинки льоду витратиться на розтавання льоду здійснюється в три етапи. Таким чином, під час очищення льодом, який отриманий заморожуванням води і має кристалічні решітки, під час зіткнення з твердою поверхнею відбуватиметься деформація його кристалічної решітки з виділенням тепла, що призводить до розтавання льоду. Очищення таким льодом не є високоефективним.

#### **1.4. Нормативна охоронна зона навколо ГТС та КС**

Об'єкти газотранспортної системи несуть потенційну небезпеку для життя та здоров'я людей, а також майна громадян, підприємств та організацій. Для забезпечення безпечної експлуатації навколо об'єктів ГТС встановлюється охоронна зона - територія, обмежена умовними лініями уздовж наземних, надземних і підземних трубопроводів та їх споруд по обидва боки від крайніх елементів конструкції магістральних трубопроводів та по периметру наземних споруд на визначеній відстані, на якій обмежується провадження господарської та іншої діяльності. Інформація про межі охоронних зон об'єктів газотранспортної системи України доступна на Публічній Кадастровій карті України у вкладенні «Енергетика».

Правовий режим земель охоронних зон магістральних газопроводів визначено Законом України «Про правовий режим земель охоронних зон об'єктів магістральних трубопроводів» [59] та «Правилами охорони магістральних трубопроводів» [60]. Законом та Правилами охорони магістральних трубопроводів для об'єктів магістральних газопроводів встановлено наступні розміри охоронних зон в залежності від класу та діаметру газопроводу:

Таблиця 1.7 - Розміри охоронних зон магістральних газопроводів

Показник	Умовний діаметр газопроводу, мм							
	газопровід I класу						газопровід II класу	
	до 300 включно	понад 300 до 600 включно	понад 600 до 800 включно	понад 800 до 1000 включно	понад 1000 до 1200 включно	понад 1200 до 1400 включно	до 300 включно	понад 300
Ширина охоронної зони з обох боків від осі, м	100	150	200	250	300	350	75	125
Розмір охоронної зони для КС (від огорожі), м	500		700				500	
Розмір охоронної зони для газорозподільних станцій (від огорожі), м	150	175	200	250	300	350	100	125
Розмір охоронної зони для газозбірних пунктів (від огорожі), м	150	175	200	250	300	350	100	125

У відповідності до частини 1 статті 14 Закону України [61] земельні ділянки, розташовані в охоронних зонах об'єктів магістральних трубопроводів, не вилучаються у їх власників або користувачів, а використовуються з обмеженнями, встановленими цим Законом та іншими нормативно-правовими актами. Власники та/або користувачі зобов'язані дотримуватися особливого режиму господарської діяльності та обмежень, які поділяються на загальні обмеження, що діють в охоронних зонах об'єктів магістральних трубопроводів незалежно від внутрішніх зон безпеки, та особливі обмеження, що встановлюються в охоронних зонах об'єктів магістральних трубопроводів залежно від категорії зони безпеки.

Зокрема границі зон безпеки застосовуються як границі санітарно-захисних зон при оцінці впливу на довкілля та визначенні заходів захисту населення від чинників впливу ГТС та КС. Організація санітарно-захисних зон (СЗЗ), дотримання її режимів здійснюється відповідно до Закону України «Про санітарно-епідеміологічне благополуччя населення» [61]. Розміри СЗЗ для проєктованих промислових об'єктів і виробництва встановлюють на підставі класифікації по ДСП 173-96 [62], розрахунків розсіювання забруднення атмосферного повітря і рівнів фізичного впливу на атмосферне повітря (шум, вібрація, ЕМП та ін.) за розробленими в установленому порядку методиками. Рівень значущості кожного екологічного чинника кількісно оцінюється з урахуванням потужності його негативного впливу, ефективності поширення (розсіювання, розведення, міграції) і

трансформації в навколишньому середовищі, нормованих показників допустимого рівня даного чинника негативного впливу, а також рівня фонового забруднення навколишнього середовища в зоні цього впливу.

До особливих обмежень, що діють у межах охоронних зон об'єктів магістральних газопроводів, належить заборона: будувати житлові будинки, виробничі чи інші будівлі та споруди, громадські будівлі; будувати гаражі та автостоянки, дачні і садові будинки та господарські споруди; будувати автомобільні дороги та залізничні колії, що проходять паралельно до магістрального газопроводу, крім випадків спорудження відомчих технологічних доріг підприємств магістральних газопроводів; розміщувати спортивні майданчики, стадіони, ринки, зупинки громадського транспорту, організовувати заходи, пов'язані з масовим скупченням людей; будувати огорожі для відокремлення земельних ділянок приватної власності, лісових ділянок, садів, виноградників тощо; висаджувати багаторічні насадження, тощо. Зокрема смуги зелених насаджень, що зазвичай рекомендуються як засіб організації СЗЗ звичайних промислових та транспортних об'єктів, підпадають під заборону до застосування у межах охоронних зон об'єктів ГТС та КС.

Зазвичай СЗЗ навколо КС встановлюється в межах її зони безпеки, тобто це 500-700 м від її огорожі, табл. 1.7. Зважаючи на високу потужність викидів ЗР (табл. 1.2) та випромінювання шуму (табл. 1.5) на стадії будівництва або реконструкції є необхідність через процедури ОВД та ОВНС в обґрунтуванні розмірів СЗЗ.

Екологічні характеристики ГТУ для конкретних ГПА, необхідні для розрахунку розсіювання шкідливих речовин в атмосферу (залежно допустимих концентрацій окислів азоту, температур і витрат продуктів згоряння на змінних режимах), повинні бути вказані в технічних умовах. Для забезпечення вимог санітарних норм у навколишньому середовищі (населені пункти за межами СЗЗ навколо КС) з урахуванням одночасної роботи різної кількості ГПА на КС за погодженням між розробником і замовником розробляють варіанти ГПА (і вихлопної труби - шахти) з різними характеристиками викидів і розсіювання. Джерела викидів ЗР від ГПА повинні забезпечувати безпечні умови розсіювання ЗВ

в атмосфері, висоту вихлопних труб (шахт) ГПА слід приймати не менше ніж на 2 м вище даху будівлі компресорного цеху (індивідуальних будинків ГПА) і на 1 м вище дефлектора.

На підставі параметрів викидів здійснюють розрахунок забруднення атмосферного повітря (урівень приземних концентрацій забруднюючих речовин в атмосферному повітрі) відповідно до ОНД-86 [63]. У розрахунках повинні використовуватися значення потужності викидів ЗР в атмосферу, віднесені до 20-хвилинному інтервалу часу. Розрахунки виконуються з урахуванням фізико-географічних і кліматичних умов району розташування об'єктів та джерел розподілу газу, що є джерелами викидів, фонового забруднення повітряного басейну і т.п.

Відповідно до вимог ГОСТ [64] для ГТУ встановлено вимоги щодо емісії  $\text{NO}_x$  і  $\text{CO}$  у відпрацьованих газах (при  $0^\circ\text{C}$ , 0,1013 МПа і умовної концентрації кисню 15%):

- вміст оксидів азоту не повинен перевищувати  $150\text{ мг/м}^3$  для ГТУ без регенерації тепла;
- для ГТУ з регенерацією тепла вміст оксидів азоту не повинен перевищувати  $200\text{ мг/м}^3$ ;
- вміст оксиду вуглецю у відпрацьованих газах не повинен перевищувати  $300\text{ мг/м}^3$ .

Нормативні вимоги щодо вмісту шкідливих речовин в продуктах згоряння енергетичних ГТУ встановлені вимогами ГОСТ 29328 (при  $0^\circ\text{C}$ ; 0,1013 МПа і умовної об'ємної концентрації кисню 15%). Відповідно до СТО Газпром 2-3.5-138 [65] вміст оксидів азоту у відпрацьованих газах (у сухих продуктах згоряння при  $0^\circ\text{C}$ , 0,1013 МПа і умовної концентрації кисню 15%) не повинен перевищувати  $100\text{ мг/м}^3$  і для низько емісійних камер згоряння -  $50\text{ мг/м}^3$ .

Екологічні характеристики ГПА (ГТУ) по кількості викидів і концентраціям викидів  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  були визначені відповідно СТО Газпром 2-1.19-332-2009 [32], ГОСТ 29328-92 [64] та наведені в табл. 1.7. Діапазон величин вказує на значення від проектних до текучих технічних нормативів викидів ЗР. Крім того, в табл. 1.7 представлені потужність ГТУ і ефективний ККД. Більшу частину від загальної емісії ЗР складає діоксид вуглецю  $\text{CO}_2$ , що утворюється при використанні



природного газу для паливних потреб ГПА КС. Тому очевидно, що зменшення викидів CO<sub>2</sub> можна досягти за рахунок зниження витрати газу на КС, заміни ГПА на нові, менш емісійні агрегати з ККД 35-39%.

Екологічні характеристики ГПА (ГТУ) за можливостями викидів і концентраціям викидів NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> були визначені відповідно СТО Газпром 2-1.19-332-2009 [66], ГОСТ 29328-92 [67], і зведені до табл. 1.8. Діапазон величин вказує на значення від проектних до поточних технічних нормативів викидів ЗВ. Крім того, в табл. 1.8 наведені потужність і ефективний ККД ГТУ. Більшу частину від загальної емісії ЗВ складає діоксид вуглецю CO<sub>2</sub>, що утворюється при використанні природного газу для паливних потреб ГПА КС. Тому очевидно, що зменшення викидів CO<sub>2</sub> можна досягти зниженням витрат газу на КС, заміни ГПА на нові, малоемісійні агрегати з ККД 35-39%.

Таблиця 1.8 - Екологічні характеристики ГПА і ГТУ за кількістю та концентрацією викидів

ГПА	ГТУ	№, МВт	η, %	Кількість викиду, г/с				Приведена концентрація, мг/м <sup>3</sup>			
				NO <sub>x</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>NOx</sub>	C <sub>CO</sub>	C <sub>CH4</sub>	C <sub>CO2</sub>
ГТК-10	ГТК-10	10	29,0	5,16-23,3	5,16-18,5	1894	114.3	180,0-788,0	60,0-625,0	6,16037	66011,3
ГПА-Ц-6,3	НК-12СТ	6	24,0	3,1-3,3	6,6-7,5	1468	43.5	140,0-147,0	300,0-338,0	6,16141	67204,7
ГПУ-10	ДР-59Л	10	27,6	4,4-6,5	1,8-3	2035	49.8	145,0-212,5	60,0-99,2	6,16615	67516,8
ГТ-6-750	ГТ-6-750	6	24,0	2,8-3,7	2,1-13,4	1385	16.5	135,0-171,0	100,0-625,0	6,16054	66591,7
ГПА-Ц-16С	ДГ-90	16	34,0	5,9-9	11,8-22,5	2617	26.3	150/80-220,0	300/150-550,0	6,1614	66827,2
ГТ-750-6	ГТ-750-6	6	27,0	3,3-15,8	2-7	1250	10.8	180,0-841,0	110,0-372,0	6,16082	67592
ГТК-25ИР	MS-5002	22	34,5	12,3-14,2	7-8	3546	23.8	230,0-253,0	130,0-143,0	6,16056	66240,2
ГТН-25	ГТН-25	28	28,1	14,7-36,9	39,1-42,1	5457	21.6	180,0-430,0	480,0-490,0	6,16108	67023
ГТК-25И	MS-5002	24	27,7	12,6-14,5	3,6-4,1	4833	14.6	175,0-192,5	50,0-55,0	6,16133	67327

Проектні технічні нормативи викидів ЗР встановлені за інтегральними показниками питомих викидів ЗР ГПА (за п'ятьма класами номінальної потужності ГПА від 2 до 31 МВт), за даними нормативної документації (технічні умови, технічне завдання, специфікації) відповідно до СТО Газпром 2-3.5-039 [68], їх приклад наведено в табл. 1.2 і 1.8.

Класифікація джерел викиду забруднюючих речовин при експлуатації газоперекачувальних агрегатів виконана відповідно до СТО Газпром 060 [69], табл. 1.9. До джерел безперервної дії відносять труби вихлопу ГПА, свічки баків з оливою і дегазаторів, до джерел періодичної дії - свічки пуску (свічки турбодетандерів) і свічки стравлювання (зупинки ГПА), до високотемпературних - вихлопні труби і свічки баків з оливою, до низькотемпературних - свічки пуску (свічки турбодетандерів), свічки стравлювання (зупинки ГПА) і свічки дегазатору. Джерела викидів ЗР від ГПА по виробничо-технологічним ознаками і з урахуванням впливу на рівень забруднення атмосфери мають класифікаційні ознаки з кодами відповідно до СТО Газпром 060 [69].

Таблиця 1.9 - Класифікація джерел забруднення атмосфери, пов'язаних з експлуатацією ГПА

Дільниця (виробництво)	Устаткування (джерело витоку)	Код виду діяльності – код ОКВЕД	Джерела викидів – код SNAP	Джерело викиду	Ознаки джерела викиду	ЗР які викидаються	
						Коди ЗР	№ CAS
Об'єкти транспортування газу		60.30.21	010504				
Компресорний цех	Газоперекачу вальні агрегати	60.30.21	010504	Вихлопна труба	1,4,7,8,11,12,1 5,19	301, 304, 337, 410, -	10102-44-0, 10102-43-9, 630-08—0, 74-82-8, 124-38-9
				Свічка турбодетандера	1,4,6,8,11,12,1 5,18	410	74-82-8
				Свічка оливобаку	1,4,7,8,11,12,1 5,19	2735	8042-47-5
	Дегазатор оливи	60.30.21	050601	Скидна свічка дегазатору оливи	1,4,7,8,11,12,1 6,18	410, 2735	74-82-8, 8042-47-5
	Газопровід «малого контуру»			Свічка стравлення	1,5,6,8,11,12,1 6,18	410	74-82-8

### 1.4.1. Базовий сценарій обчислення викидів ЗР у повітря та рівнів звуку для шуму КС

Базовий сценарій обчислення викидів ЗР, концентрацій забруднення повітря та рівнів звуку для шуму КС побудований для за звітом з ОВД реконструкції КС «Яготин» [73], проект якої передбачає переоснащення на нові більш ефективні ГПА (рис. 1.6). КС «Яготин» призначена для компримування газу, що транспортується газопроводами «Шебелинка–Диканька–Київ», «Шебелинка–Полтава–Київ» і «Єфремівка–Диканька–Київ». На час реконструкції компресорний цех (КЦ) № 1 виведений з експлуатації та демонтований. В роботі знаходиться КЦ №2, що був введений в експлуатацію в 1974-1975 р., він оснащений ГПА з приводом ГТУ типу ГТ-750-6. Кількість встановлених ГПА з одиничною потужністю 6 МВт - 12 шт., загальна потужність КЦ №2 – 72 МВт. Всі ГПА розташовані в капітальній будівлі КЦ, що складається з 2 частин – цеху „А” і цеху „Б”, в кожній з яких розміщено по 6 агрегатів (рис. 1.7). Площа ділянки реконструкції КС «Яготин» в межах промислового майданчика складає 5,06 га, який знаходиться на схід від існуючого КЦ №2, і в основному співпадає з територією, яку займав КЦ № 1. Для будівництва нового цеху пропонується використати територію виведеного з експлуатації КЦ-1, площа нової забудови - 20200 м<sup>2</sup>, площа автодоріг та проїздів - 11200 м<sup>2</sup>.

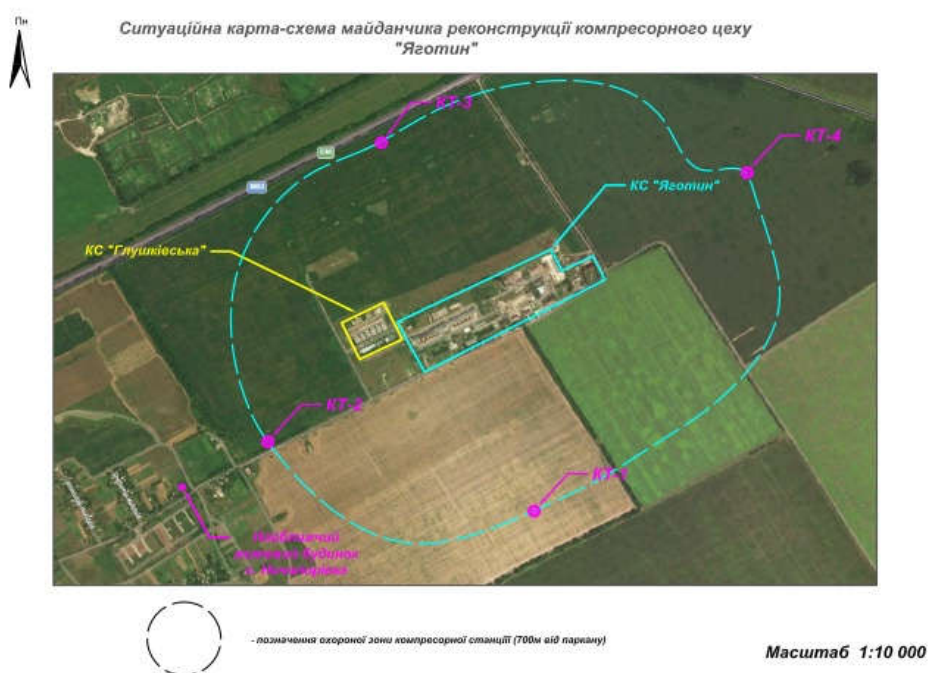


Рисунок 1.6 - Ситуаційна майданчика реконструкції компресорного цеху КС «Яготин» звіт з ОВД «Яготин» [73].



Рисунок 1.7 - КС Яготин: КЦ №2 (2А та 2Б) та площадка демонтованого КЦ №1, що планується для встановлення нових ГПА звіт з ОВД «Яготин» [73].

На основі техніко-економічного аналізу для подальшого проектування та впровадження пропонується варіант оснащення КС «Яготин» агрегатами типу ГПА-Ц-16С/57-1.7М1 виробництва «Сумського МНВО ім. М.В. Фрунзе» потужністю 16 МВт у кількості 4 шт. (3 роб. + 1 рез.). Дані ГПА відрізняються високою економічністю (ККД = 35%). КЦ в складі чотирьох агрегатів ГПА-Ц-16С/57-1,7М1 з газотурбінним двигуном ДГ90Л2.1 в блочно-контейнерному виконанні. У складі компресорного цеху передбачено встановити наступне обладнання: агрегати ГПА100...ГПА400; ємності переливу оливи Є-4/1...Є-4/4.

Основними технічними рішеннями до подальшого проектування приймається традиційна технологічна схема КС, якою передбачається установка очищення газу, установка охолодження газу, установка підготовки паливного газу – загальні для всіх 4-ьох ГПА. Система охолодження технологічного газу у складі блока АПО призначена для охолодження газу після компримування з метою забезпечення стійкості лінійної частини газопроводу та умов нормальної експлуатації ізоляції трубопроводу, а також для збільшення пропускну здатності газопроводу на КС.

Підключення ГПА, апаратів установки очищення та охолодження газу – за колекторною схемою. Відповідно до Правил [60] з метою забезпечення безпечної

експлуатації об'єктів магістрального трубопровідного транспорту встановлюється охоронна зона для компресорних станцій (від огорожі) – 700 м.

Газотурбінна установка ГТ-750-6 призначена для приводу відцентрового нагнітача газу типу 370. Нагнітач 370 - одноступінчатий, відцентровий, з консольно розташованим робочим колесом. Газотурбінна установка ГТ-750-6 (рис. 1.8) складається з газової турбіни, повітряного осьового компресора і камери згоряння, пускової турбіни, регенератора, систем регулювання, автоматичного управління, контролю і захисту.

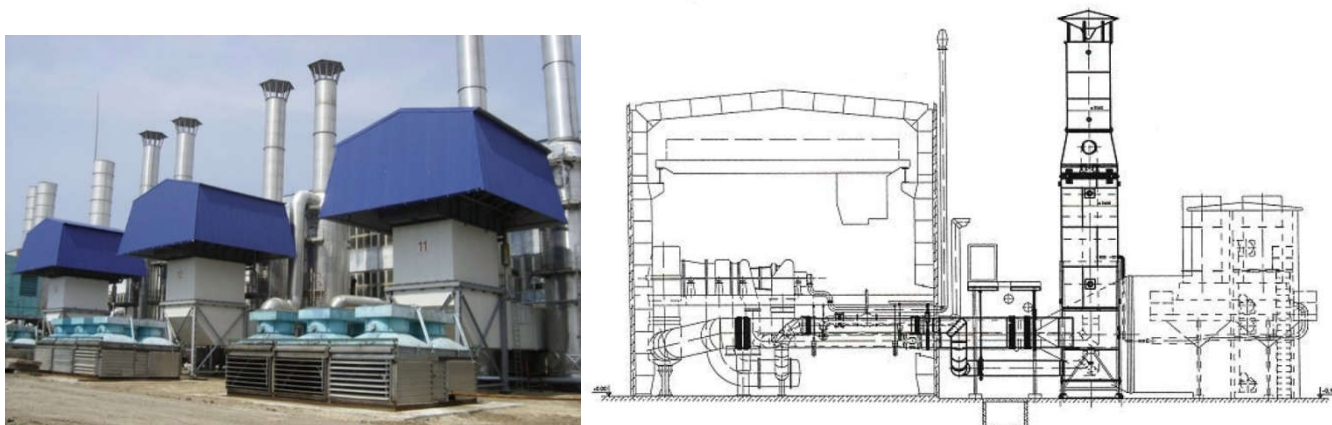


Рисунок 1.8 - ГПА з газовою турбіною ГТ-750-6 з горизонтальною камерою згоряння і вертикальними регенеративними теплообмінниками: а) вид на комплексний повітроочисний пристрій ГТ-750-6, б) компоновка ГПА

За даними обчислення звіту [73] за умови одночасної роботи обох КС після реконструкції при максимальному РЗ на території станції не перевищує нормативів ДБН В.1.1-31:2013 [30] для території житлових приміщень в нічній період (45 дБА). Розрахунок виконаний згідно ДСТУ-Н Б В.1.1-35:2013 за формулою (24) [74]:

$$L = L_W - 20 \lg r + 10 \lg \Phi - 10 \lg \Omega + \Delta L_{\text{відб}} - \Delta L_{\text{екр}} - \beta_{\text{зел}} l, \quad (1.1)$$

де  $L_W$  – коригований рівень звукової потужності джерела з постійним шумом, дБА;  $r$  – відстань від розрахункової точки до акустичного центра джерела шуму,  $r = 1200$  м – відстань до найближчого житлового будинку (с. Ничипорівка Яготинський район) від місця розташування КЦ1;  $\Phi$  – коефіцієнт спрямованості випромінювання шуму джерелом в напрямку розрахункової точки в октавних смугах частот, вважаємо джерело шуму не спрямованим, тому  $\Phi=1$ ;  $\Omega$  – просторовий кут, в який випромінюється шум даного джерела, за табл. 1 [74]  $\Omega = 2\pi$  (джерело розміщено на

підлозі);  $\Delta L_{\text{відб}}$  – величина підвищення рівня звуку в розрахунковій точці внаслідок відбиття звуку від великих за розміром поверхонь, дБ;  $\Delta L_{\text{відб}} = 3 n_1$ ,  $n_1$  – кількість поверхонь, які відбивають звук в напрямку розрахункової точки ( $n_1 \leq 3$ );  $n_1 = 1$  (земля врахована в параметрі  $\Omega$ ), відповідно  $\Delta L_{\text{відб}} = 0$ ;  $\Delta L_{\text{екр}}$  – величина зниження рівня звуку екраном, розташованим між джерелом шуму і розрахунковою точкою, дБ, в розрахунку [73] прийнято:  $\Delta L_{\text{Апов}} = 0$  дБА,  $\Delta L_{\text{Аекр}} = 0$  дБА,  $\beta_{\text{зел}} = 0$  дБА/м.

В розрахунку [73] прийнято максимальний можливий РЗ від усіх розташованих на них джерел шуму на відкритій території майданчика КС «Глушківська» – 92 дБА. За цих умов, РЗ від усіх джерел шуму, що розташовані на КС «Яготин» та КС «Глушківська», на межі найближчої житлової забудови, в населеному пункті Ничипорівка (на відстані 700 м від паркану КС), становить [73]:

від однієї КС –  $L_A = 92 - 15 \lg 700 + 10 \lg 1 - 10 \lg 2\pi = 41,3$  дБА < 45 дБА,

від двох КС –  $L_A = 10 \lg (2 \times 10^0, 1 \times 41,43) = 44,4$  дБА < 45 дБА.

У звіті з ОВД КС «Яготин» [73] РЗ за умови одночасної роботи двох КС при максимальному РЗ на території станції не перевищує нормативів ДБН В.1.1-31:2013 [22] для території житлової забудови в нічній період (45 дБА). Висновки звіту [73] виглядають дещо необ'єктивними, зважаючи на високу потужність ГПА у цілому, що застосовуються і проектується на КС Яготин, та на інформацію з проаналізованих джерел [23-28]. Зокрема в статті [28] наводяться дані вимірювання шуму в денний та нічний періоди доби, які вказують що на межі безпекової зони 700 м є перевищення і максимального, і еквівалентного РЗ, табл. 1.6. Отримані дані вказують на те, що проживання поблизу КС природного газу може потенційно призвести до відчутного впливу навколишнього шуму на населення.

## Висновки по Розділу 1

1. Основними небезпечними чинниками, що впливають на природне, виробниче та соціальне середовище під час експлуатації КС, є:

- хімічне забруднення атмосферного повітря внаслідок викидів забруднюючих речовин технологічним обладнанням КС;

- хімічне забруднення атмосферного повітря внаслідок неорганізованих витоків ЗР у разі пошкодження технологічного обладнання;
- шумове забруднення навколишнього середовища, основним джерелом якого є ГПА різних типів;
- наявність вибухо- і пожежонебезпечних речовин (метан, вуглеводні), що можуть створити техногенну небезпеку під час утворення вибухопожежних газо-повітряних сумішей.

2. Одною з основних причин зниження ККД ГТУ є відкладення бруду які утворюються на лопатках ОК, збільшують шорсткість поверхні лопаток, змінюють їх аеродинамічну форму і таким чином погіршують їх аеродинамічні характеристики, призводять до зниження ККД, напору і витрати повітря ступенів і компресора в цілому. Осадження експлуатаційних забруднень на поверхнях лопаток ротора та направляючих апаратів ОК ГТУ призводять до зниження ефективної потужності та коефіцієнта корисної дії ККД, зайвих витрат паливного газу, які можуть становити до 3% від оптимальних значень.

3. В Україні відсутні галузеві методичні документи обчислення концентрацій ЗР в атмосферному повітрі, що утворюються в результаті їх викиду стаціонарними джерелами та рівнів звуку від шуму обладнання КС на території робочої зони і населених пунктів (за межами охоронної зони КС), що обмежує своєчасне та об'єктивне встановлення СЗЗ навколо станцій магістральних газопроводів. Встановлення границі СЗЗ на межі охоронної зони КС не завжди є обґрунтованим, особливо в частині контролю несприятливого впливу шуму КС.

4. Застосування нормативної методики розрахунку концентрації в атмосферному повітрі ЗР, що містяться у викидах стаціонарних джерел підприємств ОНД-86 потребує обґрунтування, в першу чергу із-за специфічної будови гирла більшості шахт витоку газів, що відпрацювали, від ГТУ ГПА.

5. Застосування нормативної настанови з розрахунку рівнів шуму в приміщеннях і на територіях ДСТУ-Н Б В.1.1-35:2013 потребує обґрунтування, в першу чергу із-за специфіки експлуатації та випромінювання шуму провідними акустичними джерелами ГПА та іншого обладнання КС.



## РОЗДІЛ 2. ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ЗАБРУДНЕННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ЗАБРУДНЕНЬ ОК ГТУ

### 2.1. Дослідження процесу забруднення лопаток компресора ГТУ

У складі атмосферного повітря містяться домішки, які, потрапляючи у повітряний тракт ГТУ, утворюють відкладення на лопатках ОК. Незважаючи на установку спеціальних фільтрів у тракті всмоктування повітря до ГТУ, в процесі експлуатації відбувається неминуче забруднення поверхні лопаток ОК.

Основним джерелом забруднення є пил. Відкрита поверхня ґрунту є основним джерелом природного пилу в атмосферному повітрі, а вітер – головним чинником його розповсюдження. Концентрація пилу в атмосферному повітрі пропорційна швидкості вітру у кубі. Пил в атмосферному повітрі є типовою полідисперсною системою з розміром зважених часток до 100 мкм і в 1 літрі повітря кількість часток (пилинок) може змінюватися від 10 одиниць до 200 тисяч одиниць. Пил постійно переміщується з рухом повітря, частка з них осідає на поверхню, і навпаки - інша частка підіймається під дією поривів вітру, руху транспорту тощо.

Густина пилу, незважаючи на різне походження, знаходиться в межах 2,6 – 3,0 г/см<sup>3</sup>. Склад мінерального атмосферного пилу, твердість деяких його компонентів, гранулометричні характеристики пилу наведено в табл. 2.1 і 2.2 [75]. Форма пилинок залежить від їх мінерального складу. Наприклад, частки суспенчатого пилу за формою нагадують тетраедр і мають гострі грані. Пил осадових порід складається з часток овальної форми. Крім того, наявність пилу в атмосферному повітрі, яке всмоктується ОК під час роботи ГТУ, приводить не тільки до забруднення лопаток та інших вузлів установки, а й до їх ерозії. За даними [76] концентрація солі у повітрі поблизу морського узбережжя може складати 40-60 мг/м<sup>3</sup>, під час штормів вона збільшується до 800 мг/м<sup>3</sup>. Засоленість атмосферного повітря, яке всмоктується компресором ГТУ, зумовлює ще більшу ерозію лопаток та інших вузлів ГТУ, що також негативно впливає на довкілля.

З даних табл. 2.2 видно, що більшість пилинок співмірні з вічками фільтру на входів ГТУ, а твердість деяких забруднень значно перевищує твердість матеріалів,



які застосовуються для виготовлення лопаток ОК ГТУ. Відкладення на лопатках погіршують характеристики компресора: зменшується тиск за ОК, збільшується споживана потужність, падає ККД, межа помпажа компресора зміщується у бік його робочої зони. Забруднення проточної частини ОК може привести до зменшення витрати повітря до 6% і ККД осевого компресора на 2-3%, що викликає зниження корисної потужності ГТУ до 10% і ККД до 2-5%.

Таблиця 2.1 - Склад пилу і твердість його компонентів

Головний компонент	Процентний вміст компонентів пилу, %			Твердість за шкалою Мооса
	Київщина	Одещина	Приазов'я	
Кварц	79	68	34,3–41,5	7
Окис заліза	-	-	-	6
Окис алюмінію	11	14	-	9
Окис кальцію	1.0	4.0	-	-
Окис магнію	1.0	2.0	-	4.5
Калієвий шпат	-	-	45.0	6–6,5

Таблиця 2.2 - Гранулометрична характеристика пилу в регіонах України, % за масою

Розмір часток пилу, мкм	Київщина	Одещина	Приазов'я
0 – 10	10	24,8	3,8
10 – 20	18	31,2	9,3
20 – 30	19	25	13,8
30 – 50	32	13	37,2
Понад 50	21	6	40,0

Для захисту ГТУ від пилу на вході в компресор встановлюється пиловловлювач – апарат для видалення твердої фази із газового середовища (повітрязабірники), одним із головних елементів якого є фільтри грубого очищення

(зазвичай інерційні) і тонкого очищення (із нетканого та спецматеріалу). Для сучасних ГТУ рекомендовано забезпечувати допустиме забруднення на вході в ОК не більше  $0,35 \text{ мг/м}^3$ , при цьому концентрація пилинок розміром більше  $10 \text{ мкм}$  має бути не більше  $5\%$  від загального об'єму пилу після фільтра. Повітряні фільтри на вході в компресор не захищають лопатку компресора від забруднень. Це переважно забруднення розміром  $2 \text{ мкм}$  і менше, маса яких складає  $80-90\%$  від загальної кількості пилу після фільтра. В результаті, через деякий час відбувається зниження ККД ГТУ і збільшення його негативного впливу на навколишнє середовище [77].

Основний елемент пиловловлювачів – пластинчата решітка, яка являє собою пакет пластинок (аналог жалюзі), розміщених під кутом до напрямку руху потоку повітря (рис. 2.1) [78].

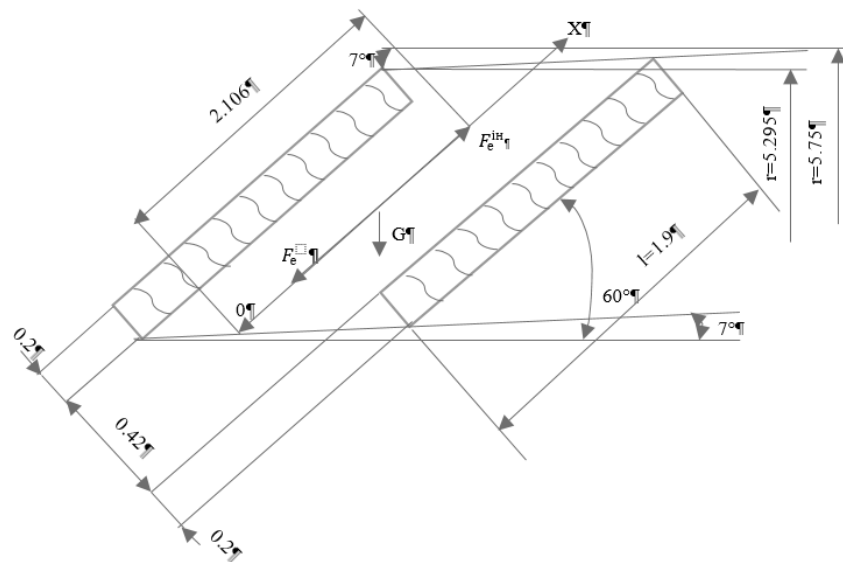


Рисунок 2.1 - Схема руху частинки в щілині решітки пиловловлювача у тракті всмоктування повітря в ГТУ

Менш пружні (непружні) частинки і ті, що рухаються під більшими кутами до лінії жалюзі, проходять в щілини і залишаються в потоці повітря. Розглядаючи відносний рух частки в потоці повітря, як прямолінійний уздовж осі  $OX$ , можна згідно [79] записати диференціальне рівняння відносного руху частки у вигляді:

$$m\ddot{x} = F_e^{in} - F_e - G \cos 30, \quad (2.1)$$

де маса частки  $m = \frac{\pi d^3}{6} \rho$ ,  $\rho$  – щільність частки (усереднено може бути визначена як  $= 2,67 \text{ г/см}^3$ ), сила інерції

$$\vec{F}_e^{in} = -m\vec{a}_e, \quad (2.2)$$

і сила опору, що визначається за формулою Стокса

$$F_o = 3\pi\mu dV_r, \quad (2.3)$$

де динамічний коефіцієнт в'язкості повітря  $\mu = 1,81 \cdot 10^{-4} \text{ дин с/см}^2$ ;  $d$  – діаметр частки, форма якої умовно вважається за кульку;  $V_r$  – відносна швидкість частки.

Після підстановки виразів (2.2) і (2.3) у рівняння (2.1) та спрощення, отримуємо:

$$\ddot{x} = a_e - \frac{18\mu\dot{x}}{d^2\rho} - g \cos 30, \quad (2.4)$$

Рівняння (2.4) розв'язували методом поділу змінних для знаходження переміщення  $x$  пилинок у відносному русі за середній час переміщення потоку в щілині пилоуловлювача  $t = 0,009 \text{ с}$  (рис. 2.2).

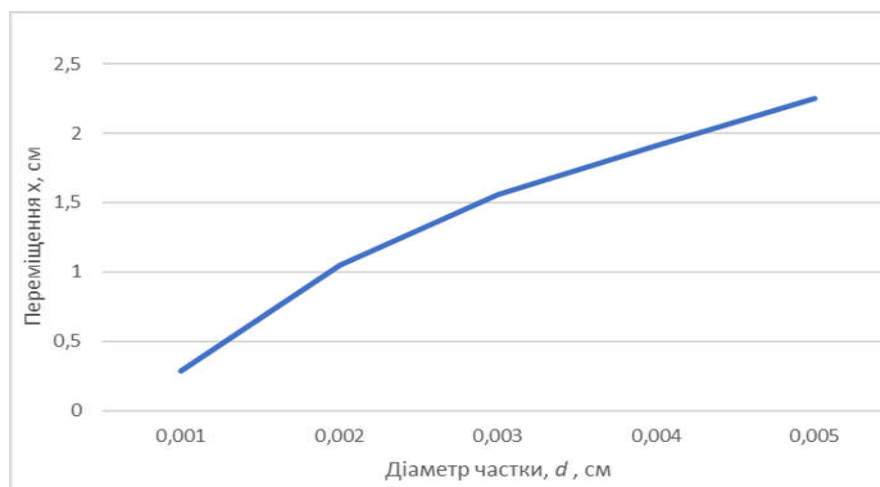


Рисунок 2.2 - Залежність переміщення  $x$  пилинок у відносному русі в щілині пилоуловлювача

Таким чином, непружні пилінки майже всі проходять разом з потоком через щілини у решітці, оскільки відносне переміщення збігається з напрямком руху потоку в щілинах. Пилоуловлювачі найбільш ефективно застосовувати для очищення повітря насиченого здебільшого пружними частинками.

Забруднення лопаток ОК під час роботи ГТУ відбувається у вигляді нальоту легкого пилу. Відкладання забруднень на лопатках ОК збільшують жорсткість

поверхонь профілів, змінюючи їх аеродинамічну форму і їх аеродинамічні характеристики, зумовлюючи зниження ККД ОК.

Ж.П. Сталдер виділяє фактори, які впливають на зниження характеристик ГТУ через забруднення і підвищують негативний вплив на довкілля:

- місцезнаходження ГТУ, стан довкілля і напрям вітру;
- конструкція, параметри і режим роботи ГТУ. Наприклад, форма вхідного патрубку та наявність на вході пристрою охолодження вхідного повітря впливає на швидкість забруднення ОК. ГТУ більшої потужності менше забруднюються, ніж ГТУ з малою потужністю.
- рівень технічного обслуговування обладнання ГТУ, а саме своєчасне проведення очищення від забруднень лопаток ОК, повітряних фільтрів або заміна останніх. Лопатки ОК без покриття забруднюються швидше.
- стан атмосфери: дощ, туман, смог, температура і відносна вологість повітря.

Дослідження під керівництвом Ольховського Г.Г. [76] показали, що відкладення на лопатках ОК на 25-85 % складаються з органічних з'єднань і 30 % з яких є ефірні масла, отримані в результаті експлуатації. Мінеральні забруднення включають переважно окисли і солі Al, Fe, Ca, Pb та інші важкі метали. Середня маса відкладень на лопатках ступенів ОК ГТ-25-700-1 ЛМЗ, розподіляється нерівномірно: 83 % приходить на лопатки КНТ і 17 % на лопатки КВТ [78].

## **2.2. Дослідження забруднення лопаток осевого компресора.**

Авторами було проведено дослідження забруднення лопаток 16-ступеневого ОК агрегату ГТК-25Н в умовах роботи компресорної станції магістрального трубопроводу. Для визначення наявності забруднення використовуються два основних методи – візуальний контроль з наступним фотографуванням забруднених поверхонь, контроль за зміною характеристик агрегату [80] і фізико-хімічні методики.

Напрацювання агрегату після капремонту складає приблизно 16900 год, при цьому агрегат працював без очищення ОК, агрегат на вході обладнано пакетними фільтрами, але вони не забезпечують повного очищення повітря від частинок

діаметром 2-3 мкм і менше, які змішуючись з вологою атмосферного повітря і підтіканням олив із переднього підшипника, викликали забруднення лопаток ОК.

Відкладення з лопаток знімалися спеціальними пластмасовими шпателями, щоб не пошкодити покриття лопаток. На рис. 2.3 наведено розподілення мас відкладень на спинках однієї з лопаток з 1-го до 6-го ступенів ОК. Із отриманих даних витікає, що забрудненню підлягають перші п'ять ступенів ОК. Забруднення лопаток зменшується впродовж проточної частини за рухом повітря. Лопатки інших ступенів мають дуже тонкий наліт, практично майже чисті. Дослідження розподілення забруднень на поверхні лопатки візуально з наступним фотографуванням – рис. 2.4 і рис. 2.5.

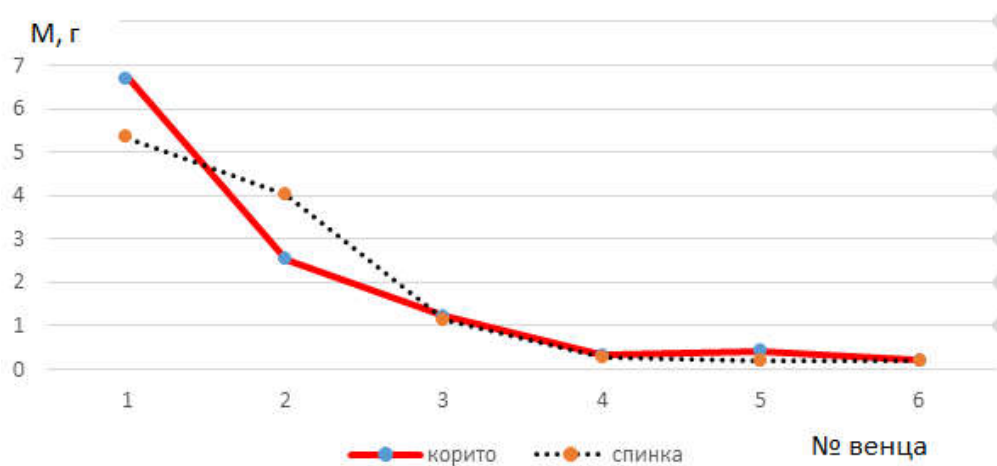


Рисунок 2.3 - Розподіл відкладень на спинці і кориті робочих лопаток ОК агрегату ГТК-25Н

Проведені авторами дослідження відкладень, зібраних з поверхонь лопаток, показали, що вони містять - вуглеводного конденсату 35-50%, вологи 45-70%, механічних домішок 8-12 %, мінеральної сажі 3-5 %, продуктів корозії – 0,5-1,5 %. Хімічний склад проб пилу із повітряного фільтру і відкладень на лопатках ОК ГТУ наведено в табл. 2.4 і 2.5.



Рисунок 2.4 - Забруднення лопаток ВНА, НА-1 НА-2 у верхній половині статора



Рисунок 2.5 - Забруднення лопаток НА-4, НА-5, НА-6 і НА-7 у верхній половині статора

Таблиця 2.4 - Хімічний та кількісний склад проб з фільтрів та лопаток ОК ГТУ

Проба	pH	Залишок після прокалювання, %
№ 1	5,6	62
№ 2	4,5	28

Таблиця 2.5 - Хімічний склад пилу з повітряного фільтра і відкладень на лопатках ОК ГТУ

Проба	Масова концентрація, %									
	Na	K	Zn	Pb	Ca	Fe	Si	Al	S	Олива
№ 1	0,88	1,4	0,12	0,028	2,8	4,2	11	5,8	1,5	3,8
№ 2	0,82	0,65	0,44	0,047	1,3	7,3	1,1	0,53	3,4	9,2

Проведені фізико-хімічні аналізи відкладень дозволили встановити, що основною причиною їх утворення на лопатках ОК є машинна олива, яке в середині компресора за умов підвищеному тиску і температури активно взаємодіє з киснем, вологою і двоокисом сірки, що мають місце у повітрі компресорного цеху. Процеси їх взаємодії призводять до утворення твердих погано розчинних сульфо- і карбонових кислот, а також їх ефірів. Такі продукти є зв'язуючим елементом для пилу, який заноситься з повітрям, що збільшує швидкість утворення і товщину відкладень на лопатках ОК [78].

Таким чином, запропоновано поділяти забруднення, які присутні в компресорі ГТУ на атмосферні (зовнішні) і технологічні (внутрішні) рис. 2.6 [99].

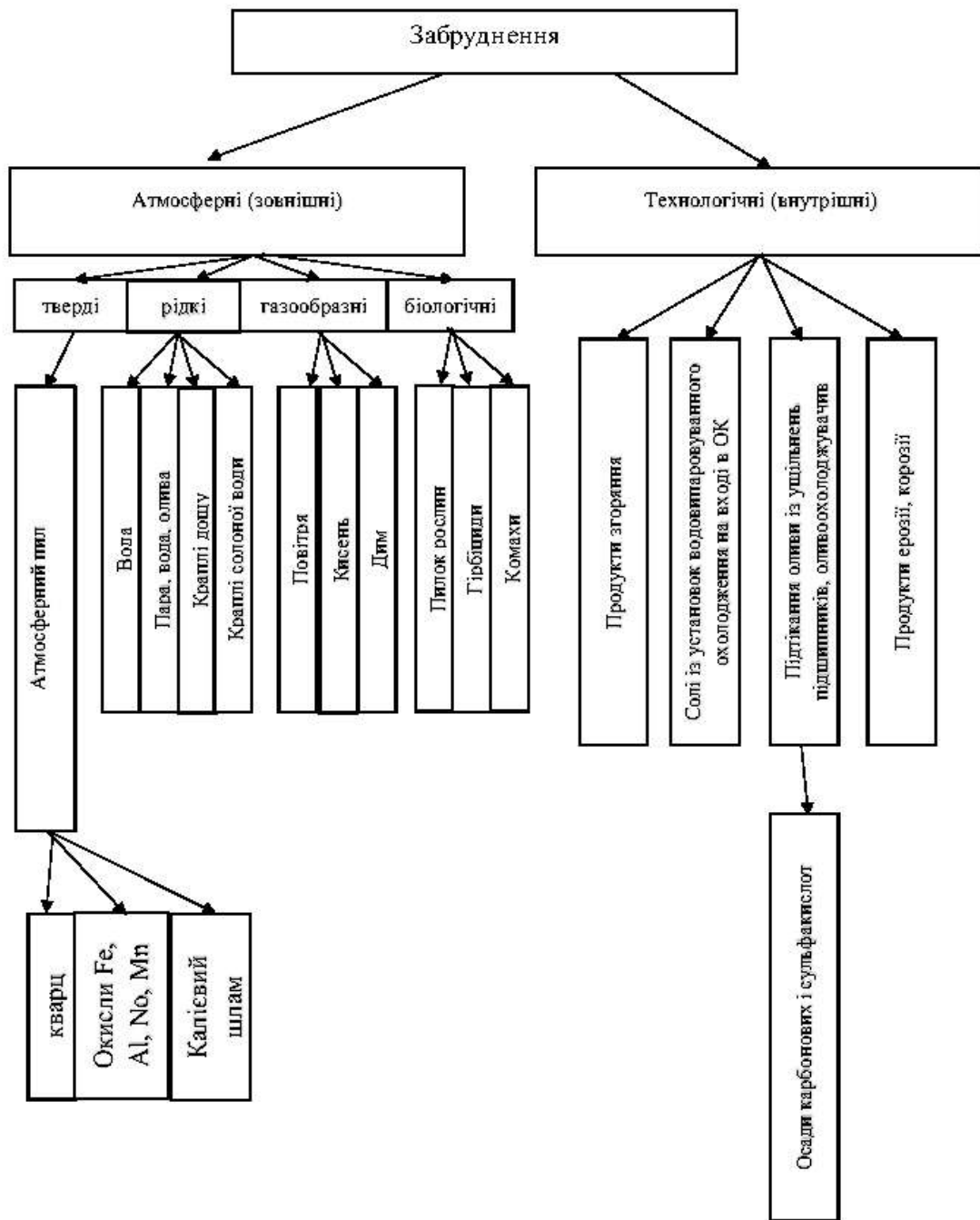


Рисунок 2.6 - Схема поділу забруднення, які присутні в компресорі ГТУ

Розрахунок характеристик промислових компресорів наведений в методиці НВО ЦКТИ, яка заснована на узагальнених даних продувок плоских решіток [79]. Ця методика використовується в якості перевірного розрахунку осьового компресора по середньому радіусу і випробувана програма дозволяє вести розрахунок ОК з будь-яким числом ступенів, а також розраховувати характеристики

компресора при повороті лопаток вінців, при наявності одного або декількох випусків повітря.

Розглядаючи механізм відкладення або захоплення частинок поверхнею, використовуємо підхід, розроблений в [81]. Осадження частинок на поверхні лопатки відбувається під дією сил інерції, що діють на частинку і примушують її рухатися поперек вигнутих ліній потоку (Відхилятися від ліній потоку повітря). Внаслідок цього, частинка пилу (бруд) стикається з тілом, яке визвало викривлення лінії потоку, і може прилипнути до нього. Коефіцієнт захоплення або фактор сепарації  $E$ , слідуючи [75], визначається як відношення кількості пилинок, що співударяються з поверхнею предмета, до кількості пилинок, які могли б потрапити на предмет, рис. 2.7. Граничній траєкторії відповідає траєкторія, рухаючись уздовж якої частинки ще захоплюються циліндром. Передбачається, що всі частинки прилипають до тіла при зіткненні з ним. На рис. 2.7 показані траєкторії частинок і лінії потоку при обтіканні циліндричного тіла. Якщо частки рівномірно розподілені в повітрі на відстані перед тілом, а радіус частинок значно малий у порівнянні з радіусом циліндра, то

$$E = \frac{h}{L}, \quad (2.5)$$

де  $h$  - відстань від центральної лінії потоку до граничної траєкторії на нескінченно великій відстані від циліндра вверх по потоку, м;  $L$  - характерний розмір тіла, м, в даному випадку  $L=R$ ;  $R$  - радіус циліндра, м.

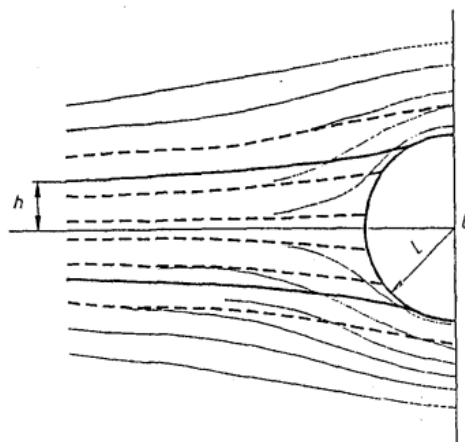


Рисунок 2.7 - Інерційне осадження частинок на циліндричній поверхні



У загальному випадку величина  $E$  може бути представлена в вигляді функції від числа Стокса для пилинок і числа Рейнольдса для потоку [82]:

$$E = f\left(Stk, \frac{d_p}{2L}, Ref\right), \quad (2.6)$$

де,  $Stk = \frac{\rho \cdot d_p^2 \cdot c_0}{18\mu 2L}$  – число Стокса для пилинок;  $Ref = \frac{\rho 2L c_0}{\mu}$  – число Рейнольдса для потоку;  $d_p$  – діаметр пилинки, м;  $c_0$  – швидкість течії, м/с;  $\mu$  – динамічна в'язкість повітря, Па·с;  $\rho$  і  $\rho$  – щільність пилинки і повітря кг/м<sup>3</sup>.

В роботі визначено, що процес забруднення лопатки не характеризується лінійною залежністю від часу і при певному напрацюванні, в інтервалі 2-3 тис. год., спостерігається стабілізація показників ОК. Відкладення на лопатках компресора уздовж його осі поступово зменшуються, тобто остання ступінь компресора забруднюються набагато менше від першої. Відкладення забруднень більше спостерігаються на опуклій стороні лопатки. Підвищення вологості повітря на вході також сприяє збільшенню утворення відкладень на лопатках. Насамперед забруднення охоплює перші 4-5 ступенів ОК і убуває від ступені до ступені у напрямку повітря. Решта лопаток ОК, як правило, забруднюються в незначній мірі. Перший ступінь ОК першим приймає на себе забруднений потік повітря, в результаті, забруднюється більше за інших.

Очевидно, що процес забруднення відбувається безперервно в часі зумовлюючи «старіння» ГТУ – тобто втрату його основних технічних властивостей (рис. 2.9). При розробці методу розрахунку характеристик забрудненого ОК доцільно використовувати дискретно-прогресивну модель забруднення. Такий підхід використаний в [83, 84]. Під час процесу забруднення у часі передбачається, що процес відбувається стадіями від першої до п'ятої. На першій стадії (приблизно через 300 год. напрацювання) в основному забруднюється перша ступінь ОК. На другій стадії в такій же мірі забруднюється друга ступінь, а перша ступінь подвоює свій рівень забруднення і т.д. аж до останньої 5-ої забрудненої ступені, що відповідає п'ятій стадії забруднення ОК. П'ята стадія приблизно відповідає часу напрацювання 1500 год., коли настає стабілізація забруднення, тобто подальшого помітного зниження корисної потужності ( $Ne$ ) і ККД ( $\eta_e$ ) ГТУ не відбувається.

Як відомо, при забрудненні напірна характеристика і крива ККД одиночної ступені зміщуються вниз і в бік менших коефіцієнтів витрати, тобто при роботі ступені на дросельної лінії через забруднення знижуються коефіцієнти напору, витрати, а також КПД (рис. 2.8). Отже, при побудові математичної моделі розрахунку характеристик забрудненої ступені в існуючі методи розрахунку необхідно ввести поправки на тиск і ККД ступені, що враховують чутливість ступеней компресора до забруднення, а також напрацювання ОК в умовах забрудненого потоку.

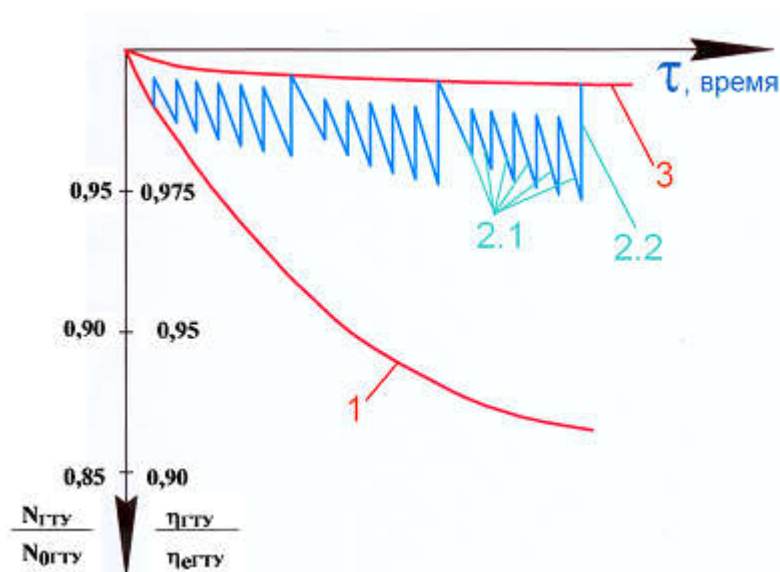


Рисунок 2.8 - Графік залежності відносної потужності та ККД ГТУ від часу і умов експлуатації: 1 - без промивки; 2.1 - з періодичним промиванням на ходу; 2.2 - з періодичним промиванням на холодному прокручуванні; 3 - «старіння» ГТУ

### 2.3. Вплив експлуатаційних забруднень ОК ГТУ на ефективність його роботи

Широке застосування для дослідження впливу забруднення ОК на характеристики авіаційних і стаціонарних ГТУ знайшов метод малих відхилень [75, 76, 85]. Однак, застосування такого методу при оцінці впливу забруднення ОК на характеристики ГТУ має деякі особливості пов'язані з необхідністю введення деяких нових емпіричних залежностей. При застосуванні цього методу для широко використовуваного на газопроводах типу ГТУ з вільною силовою турбіною, регульованими соплами СТ без регенератора і з регенератором [77] ГТК-25И можемо спостерігати зниження ККД при забрудненні ОК (подібно до наведених на рис. 2.8). Зміна ККД компресора через забруднення в багатьох випадках досить

важко виміряти через похибки в межах  $\pm 1\%$ . Показники манометрів на вході і виході з ОК виводяться на станційний щит, тому ці дані можна використати для діагностики стану проточної частини. Тому з параметра при оцінці впливу забруднення/очищення доцільно вибрати мале відхилення відносини тисків на вході і на виході з ОК -  $\delta\pi_k$ . При забрудненні ОК через зниження його ККД має місце зміщення ізодром  $\bar{n} = const$  зі зменшенням витрат повітря і відносини тисків ОК.

Як вище зазначалося, в експлуатаційних умовах забруднення схильні перші 4-5 ступенів ОК з зменшенням забруднення лопаток уздовж проточної частини. Наростання забруднення в кінцевих степенях, коли перші ступені залишаються відносно чистими, характерно для неправильно виконаних промивок проточної частини, коли при відмиванні перших ступенів бруд попадає і забруднює другу половину компресора. В даній роботі постійний коефіцієнт, що залежить від ступеню і характеру забруднення компресора -  $z_{\eta G}$ , приймається  $z_{\eta G} > 1$ , тобто, основне забруднення відбувається на перших ступенях. В роботі [77] при збільшеному (природному) забрудненні перших ступенів у порівнянні з іншими ступенями, значення  $z_{\eta G}$  становили 1,54-2,5. ці величини  $z_{\eta G}$  отримані на основі розрахункових і дослідних даних. Значення  $= 2,5$  відповідало сильно забрудненому компресору. Відомі опубліковані дані про вплив забруднення на параметри компресора і отримана нами оцінка коефіцієнта наведені в табл. 2.1. Без урахування даних п. 7 і п. 8 табл. 2.6, для теплових схем ГТУ з одним цикловим ОК для коефіцієнта  $z_{\eta G}$ , можна прийняти середнє значення  $z_{\eta G} = 2,0$ . Надалі ця величина може бути уточнена при отриманні додаткових даних про вплив забруднення на характеристики ОК.

Якщо уявити величину зміни ККД ОК,  $\delta\eta_k$ , у вигляді двох доданків [85]:

$$\delta\eta_k = \delta\eta_{k1} + \delta\eta_{k2}, \quad (2.7)$$

де перший доданок  $\delta\eta_{k1}$  обумовлює зміну  $\pi_k$  при постійній роботі стиснення ОК, величина  $\delta\eta_{k2}$  визначає зміни ККД ОК через зміну роботи стиснення. Величина  $\delta\eta_{k1}$ , визначає зміщення ізодроми, при якій відношення тисків змінюється на величину  $\delta\pi_k$ , а витрата повітря на вході в ОК - на  $\delta\bar{G}_{вх}$ .

Таблиця 2.6 - Вплив забруднення на параметри компресора і ГТУ

№	Автор, джерело		Зниження параметрів через забруднення, %					
			$\delta G_k$	$\delta \pi_k$	$\delta \eta_k$	$\delta N_{ГТУ}$	$\delta \eta_\epsilon$	$z_{\eta c}$
1	Saravanomutto, Lakshiniarasimha, [8]		-5,0	-	-2,5	-10,0	-	2
2	Diakunchak (Вестингауз), ГТУ великої потужності [9]		-5,0	-	-2,5	-7,0	-2,5	2,7
3	Hoefl, (ф. Джии), [10]		-5,0	-5,0	-	-12,5	6,3	-
4	Zaba, (ABB), [7]		-5,0	-	-2,0	-9,5	-4,9	2,5
5	Lynch [11]		-8,0	-13,7	-	-17,0	-7,0	-
6	Ольховський, Тиришкін, [12], [13]		-(5-7)	-	-(3-4)	-	-	1,7
7	Ольховський, [14]		-(10- 15)	-	-(10- 15)	-	-	1,0
8	Розенберг, Рослик, [15] (засолення ОК)		-5,77	-3,5	-5,4	-	-	1,07
9	Щуровський, [16]	ГТК-25	-1,77	-1,77	-1,0	-3,58	-1,74	1,77
		ГТК-25И	-1,23	-1,23	-1,0	-2,62	-1,7	1,23
10	Щуровський, ГТК-10 [16]		-	-	1,8	5,8	3,6	1,77

Дійсно, робота яка витрачається на стиснення 1 кг повітря в компресорі дорівнює:

$$H_k = \frac{k}{k-1} RT_1^* \left( \pi_k^{\frac{k}{k-1}} - 1 \right) \frac{1}{\eta_k} \quad (2.8)$$

При постійній роботі стиснення зміна ККД на величину  $\delta \eta_{k1}$ , що призводить до наступної зміни відносин тиску:

$$\delta \eta_{k1} = \kappa_1 \delta \pi_k + \delta T_1^* \quad (2.9)$$

Як приклад наведені коефіцієнти впливу для агрегату ГТК-25И (з нагнітачем М5352 В (К)) [86]. Для визначення параметрів зміни ефективності ГТУ потрібно враховувати коефіцієнти впливу  $K$  які наведені в табл. 2.7 [86].

Таблиця 2.7 - Коефіцієнти впливу для агрегату ГТК-25И

Коефіцієнти	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	$\frac{1}{\varepsilon_{\text{ГТГ}}} - K_1$
Величина	0,630	0,7917	1,1726	0,2223	0,4880	0,7383	-0,13

Коефіцієнти впливу  $\pi_{\text{к}}$  і  $\Pi_{\text{к}}$  на зміну параметрів ГТУ наведені в табл. 2.8 і 2.9.

Таблиця 2.8 - Коефіцієнти впливу  $\pi_{\text{к}}$  і ККД  $\Pi_{\text{к}}$  на зміни параметрів ГТУ (без регенератора)

Змінна величина	$T_1^* = \text{const}, n_{\text{ТВД}} = \text{const}$								
	$\delta N_e$	$\delta \Pi_e$	$\delta \pi_{\text{к}}$	$\delta G_{\text{в}}$	$\delta T_2$	$\delta \Pi_{\text{к}}$	$\delta \pi_{\text{ТВД}}$	$\delta \pi_{\text{ТНД}}$	$\delta T_6$
$\delta \pi_{\text{к}} = -1,0\%$	-1,78	-0,815	-1,00	-1,00	-0,063	-0,50	-0,164	-0,836	+0,222
$\delta \Pi_{\text{к}} = -1,0\%$	-3,56	-1,63	-2,00	-2,00	-0,126	-1,00	-0,328	-1,66	+0,444
$\delta \pi_{\text{к}} = -5,0\%$	-8,90	-4,07	-5,00	-5,00	-0,32	-2,50	-0,85	-4,15	+1,112

Таблиця 2.9 - Коефіцієнти впливу на зміни параметрів ГТУ (з регенератором)

Змінна величина	$T_1^* = \text{const}, n_{\text{ТВД}} = \text{const}$								
	$\delta N_e$	$\delta \Pi_e$	$\delta \pi_{\text{к}}$	$\delta G_{\text{в}}$	$\delta T_2$	$\delta \Pi_{\text{к}}$	$\delta \pi_{\text{ТВД}}$	$\delta \pi_{\text{ТНД}}$	$\delta T_6$
$\delta \pi_{\text{к}} = -1,0\%$	-1,78	-0,55	-1,00	-1,00	-0,063	-0,50	-0,164	-0,836	+0,222

Як видно з табл. 2.8 і 2.9 для безрегенеративної і регенеративної ГТУ коефіцієнти впливу є однаковими, за винятком зміни ефективного ККД ГТУ - для регенеративного варіанту коефіцієнт впливу для  $\Pi_e$  в 1,48 рази менший.

Отримані дані показують, що при зниженні через забруднення впливу  $\pi_{\text{к}}$  (або  $\delta \bar{G}_{\text{в}}$ ) на 5% корисна потужність ГТУ зменшується на 8,9%, ККД ГТУ - на 4% для безрегенеративної ГТУ (на 2,7% для агрегату з регенерацією). Це відповідає зниженню ККД ОК на 2,5%, як раніше згадувалось іншими дослідженнями.

## 2.4. Технологія очищення осьових компресорів ГТУ від забруднень гранулами аморфного льоду.

Для підтримки оптимальної роботи ГТУ виконується періодичний контроль за технічними показниками компресора під час роботи ГТУ. Збільшення витрат паливного газу у разі оптимальних атмосферних параметрах навколишнього середовища свідчить про забруднення ОК. У цьому разі потрібно здійснювати технологічну операцію очищення деталей ОК від експлуатаційних забруднень. Досягти вищих результатів під час очищення ОК ГТУ існуючими способами можна застосувавши нову технологію очищення, засновану на використанні низькотемпературних крижаних гранул з особливими фізичними властивостями, отриманих спеціальною технологією охолодження води.

Якщо розглянути процес очищення поверхні гранулами льоду з аморфною структурою ґрат, то ймовірно під час зіткнення з твердою поверхнею відбудуватиметься деформація його кристалічних ґрат з виділенням тепла, що призводить до розтавання льоду (рис. 2.9) Аморфний лід може дробитися в момент зіткнення з твердою поверхню, але частки подрібненого льоду все одно будуть виконувати свою робочу функцію. Процес контакту гранули льоду з поверхнею становить близько  $1 \times 10^{-5}$  с, що можна вважати миттєвим контактом. Але, якщо розкласти момент удару гранули об поверхню, отримаємо три етапи (рис. 2.9): 1) момент контакту; 2) утворення води в зоні контакту гранули льоду з поверхнею; 3) витискування води з зони контакту тиском за рахунок інерційних сил гранули й утворення кумулятивного ефекту. Струмінь має високу енергією, здатну ефективно видаляти будь-які забруднення. Під час удару за рахунок імпульсу сил, які виникають у зоні удару, вода видавлюється з великою швидкістю з-під гранули. Імовірно, лід із аморфною структурою, зіштовхуючись із поверхнею, не розтаватиме, зберігаючи свою кінетичну енергію [87].

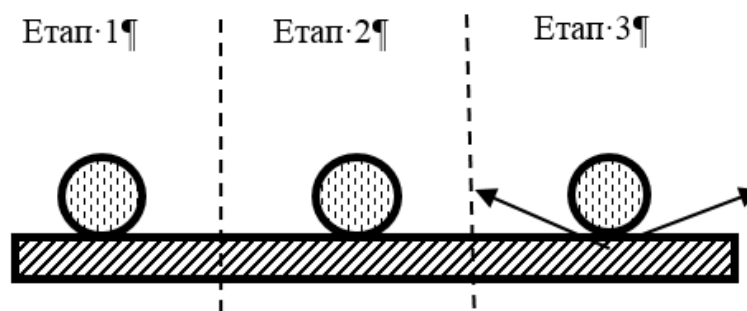


Рисунок 2.9 - Схема взаємодії льоду з ґратками аморфної структури при зіткненні гранули з поверхнею яка очищується від забруднення

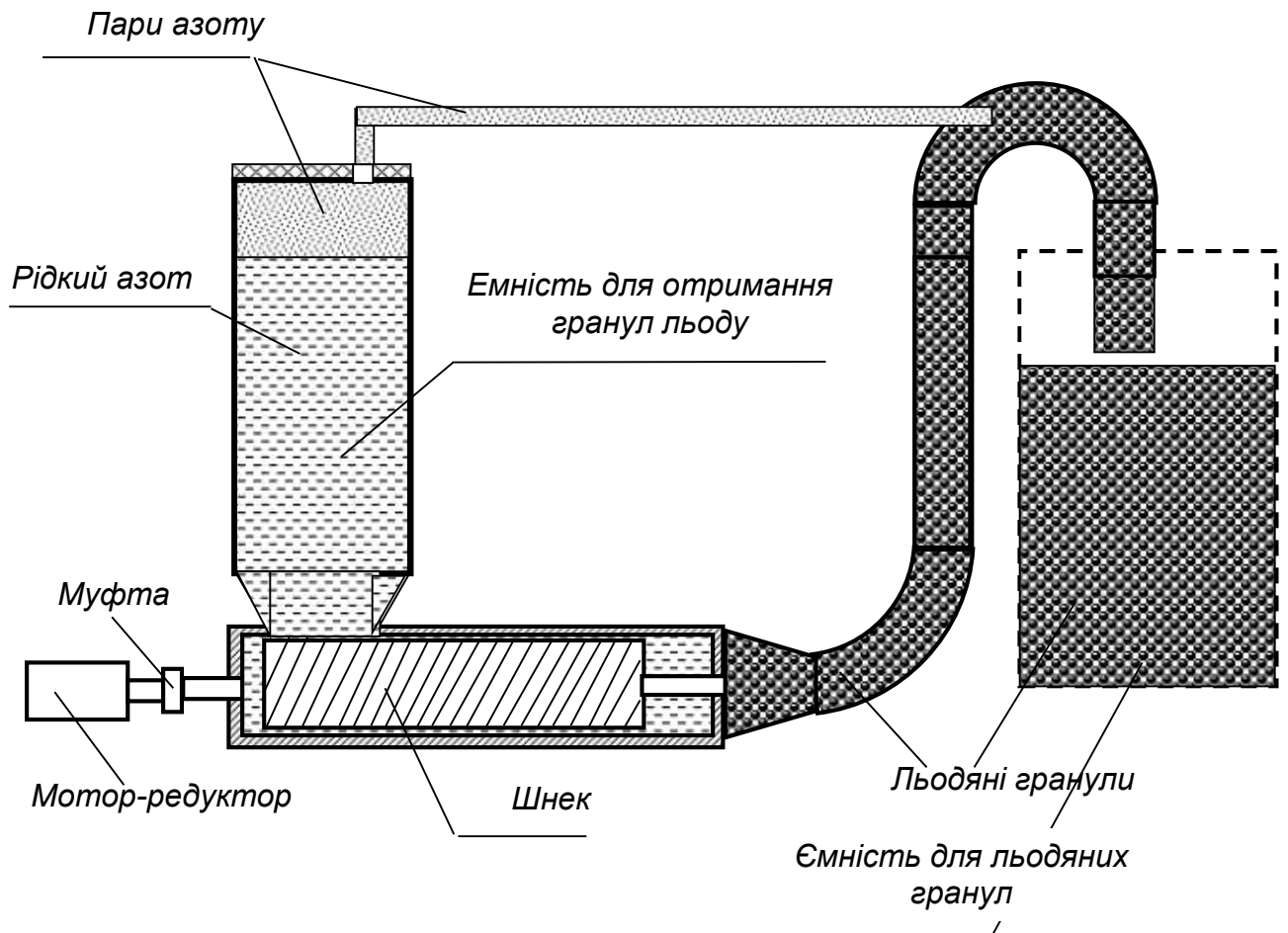
Аморфний лід (некристалічний «склоподібний» лід) – це тверда аморфна форма води, яка виробляється або шляхом швидкого охолодження води (тому молекулам не вистачає часу для утворення кристалічної решітки), або стисканням звичайного льоду при низьких температурах. Такий лід імовірно повинен мати фізичні властивості, які можуть бути ефективні в разі його використання для очищення поверхонь, щоб енергія зіштовхування гранули з поверхню лопатки ОК витрачалася більше на очищення поверхні, а не на розтоплювання льоду.

Отримати лід з аморфною структурою можливо лише в умовах достатньо швидкого охолодження води (порядку  $1 \times 10^6$  К в секунду). За таких умов молекули води не встигають сформувати кристалічні ґрати [88-93]. Якщо температура води менша за  $-140$  °С, рухомість молекул води настільки падає, а в'язкість зростає, що вода утворює склоподібне тверде тіло з аморфною структурою, яка властива рідинам [105]. При цьому в області невисокого тиску утворюється аморфна фаза низької щільності, а в області підвищених – аморфна фаза високої щільності, тобто вода демонструє поліаморфізм. Якщо змінювати тиск або температуру, одна аморфна фаза стрибком переходить в іншу з несподівано великим змінням щільності.

На рис. 2.10 наведений пристрій для отримання гранул льоду полідисперсного складу розміром від 2 до 5 мм. Для визначення оптимального режиму об'ємної подачі гранул льоду на ефективність очищення ОК ГТУ була використана установка, що наведена у Додатку А. Періодичне очищення ОК ГТУ можна



здійснювати в процесі роботи ГТУ без її зупинки. Введення крижаних гранул в ОК ГТУ здійснюється за допомогою спеціального пристрою для подачі крижаних гранул, яке здійснює рівномірну подачу гранул по всьому контуру ОК ГТУ (рис. А.2 у Додатку А).



а)



б)

Рисунок 2.10 - Пристрій для отримання льоду: а) принципова схема; б) експериментальна установка



Попередні випробування технології очищення поверхонь крижаними гранулами показали, що продуктивність очищення і її ефективність перевищує ефективність очищення поверхонь, наприклад кісточкової крихтою. У ході проведення експерименту були отримані гранули низькотемпературного льоду аморфної структури (рис. 2.10) з використанням як холодоагенту рідкого азоту. У ході проведення експерименту вода вприскувалась у ємність з рідким азотом, де вона перетворювалась у гранули.

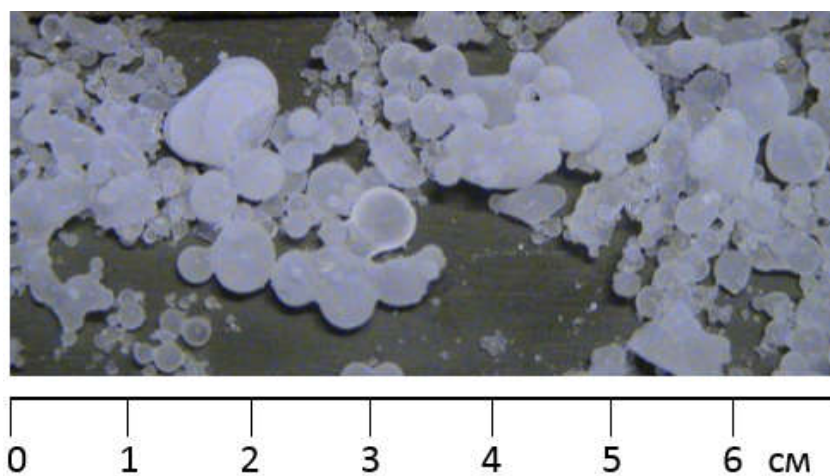


Рисунок 2.11 - Гранули льоду, заморожені в рідкому азоті

З метою перевірки ефективності процесів очищення поверхонь від різних типів покриттів і експлуатаційних забруднень за допомогою переохолоджених крижаних гранул води були проведені експериментальні дослідження очищення різних поверхонь від різних типів забруднення. Для проведення експериментальних досліджень був розроблений стенд, в складі: теплоізовованої ємності об'ємом 1 куб. метр для отримання і зберігання гранул льоду; механічного розпилювача води; ємності для рідкого азоту; повітряного сопла ежекторного типу для формування аерозольного потоку зі стисненого повітря і переохолоджених (до температур нижче мінус 150 °С) крижаних гранул. Швидкість крижаних гранул становила від 150 до 300 м/с. Пляма контакту крижаних гранул з поверхнею зразка становила від 20 до 30 мм. У таблиці додатку А приведені деякі показники з очищення поверхонь.

На першому етапі робіт проводилася перевірка ефективності видалення старого лакофарбового покриття з поверхні. Зокрема видалення лакофарбового покриття з кисневої ємності проводилося за період часу аналогічний часу очищення такої ємності аерозольним потоком кісточкової крихти. При цьому, на відміну від процесу очищення кісточкової крихти, був відсутній вторинний пил.

Також була досліджена ефективність видалення лакофарбового покриття зі зразків обшивки літака. При очищенні ЛКП зразків, льодяні гранули дозволяли видаляти як безпосередньо стару фарбу, так і ґрунтове покриття. При цьому, негативного механічного впливу на металеву поверхню не спостерігалось. Додатково були проведені дослідження впливу очищенням льодяними гранулами на зміну температури досліджуваного зразка обшивки. Для цього, з тильної поверхні зразка, встановлювався датчик температури з діапазоном вимірюваних температур від  $+50^{\circ}\text{C}$  до  $-150^{\circ}\text{C}$  і з точністю вимірювання  $0,5^{\circ}\text{C}$ . При обдувці поверхні зразка потоком гранул температурний датчик не зафіксував помітної ( $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ) зміни температури, тобто його охолодження зразка не відбувалося. Отриманий результат показав, що при взаємодії з твердою поверхнею не відбувається її охолодження за рахунок передачі негативної температури від гранул. В цьому випадку процес зіткнення сприяє плавленню гранули в точці удару з подальшим плавленням гранули в зоні контакту.

Так само були проведені дослідження з очищення поверхонь лопаток компресора авіаційного двигуна Д-36 від експлуатаційних забруднень. Для цього, окремі лопатки компресора з першої по шосту ступінь, і мають значні експлуатаційні забруднення, піддавалися очищенню за допомогою аерозольних потоків переохолоджених крижаних гранул. Результати досліджень показали високу ефективність очищення поверхонь лопаток від експлуатаційних забруднень крижаними гранулами (рис. 2.12 і 2.13).

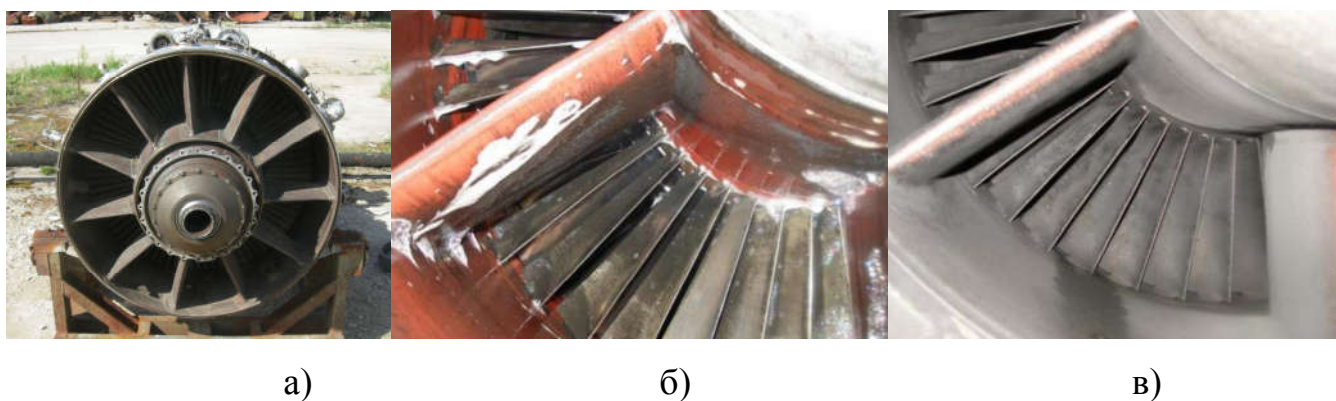


Рисунок 2.12 - Очищення компресора авіаційного двигуна Д-36 від експлуатаційних забруднень: а) вид компресора на вході; б) забруднений спрямляючий апарат компресора; в) очищений спрямляючий апарат компресора

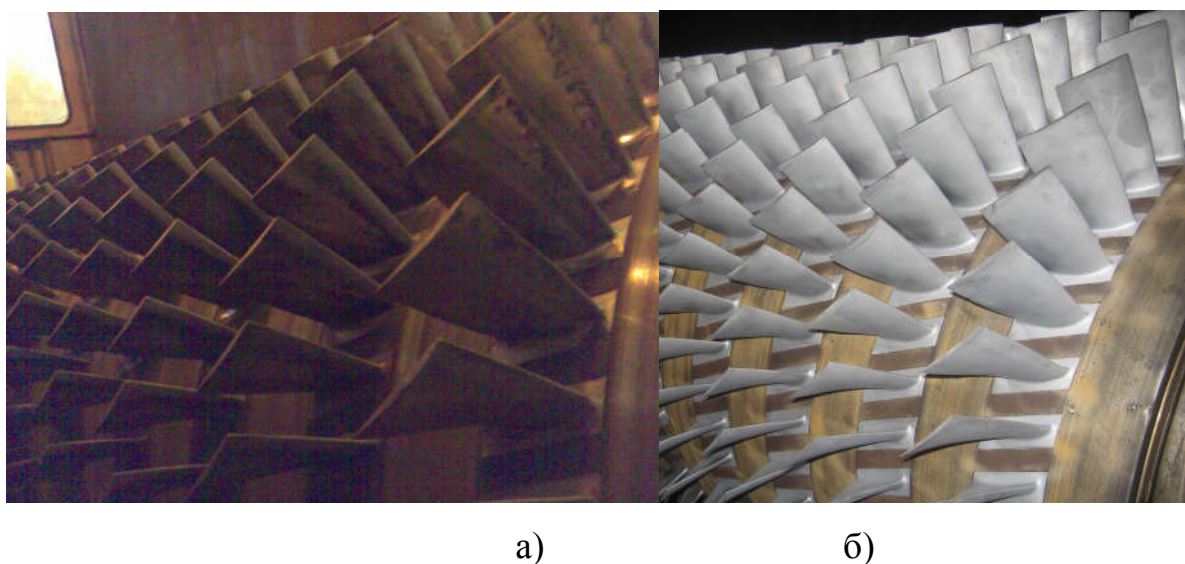


Рисунок 2.13 - Очищення осьового компресора від експлуатаційних забруднень: а) забруднений ротор компресора; б) очищений ротор компресора

## 2.5. Очищення від забруднень ОК ГТУ за допомогою гранул льоду на холодному прокручуванні і на інших режимах роботи. Оцінка його екологічної ефективності

У розділі 1 дисертації були наведені загальні вимоги до систем промивання осьових компресорів, які використовуються й досі. Системи промивки компресора не повною мірою враховують фізичну сторону процесу забруднення проточної частини ОК: розподіл забруднення за ступенями, характер відкладень (розчинні

водою або нерозчинні, чи їх суміш), особливості наростання забруднення протягом часу. Режими промивання які застосовуються - на ходу і на холодному прокручуванні, як правило, далекі від оптимальних і виконуються як правило однією і тією ж системою форсунок, встановлених у тракті всмоктування повітря або патрубку ОК, або безпосередньо перед вхідним конфузоровим компресора. В останні роки такі фірми як Турботект, Дженерал Електрик, Сіменс, РМС і інші, накопичили значний досвід як в області розробки обладнання для промивки ГТУ, так і в розробці рідких очищувачів. Система промивання осьового компресора на ходу і на холодному прокручуванні, знайшло використання в практиці.

В результаті досліджень, які були проведені, були визначені умови, при яких досягається максимально ефективна промивка компресора газової турбіни. Перш за все, це додатковий тиск за допомогою якого форсунки розганяють гранули аморфного льоду в пістолетах, цей діапазон від 0,3 до 0,4 МПа (в залежності від застосування системи та виду газотурбінної установки). Такого тиску достатньо для забору гранул льоду по шлангу подавання, діаметр якого 32 мм, з ємності для зберігання та транспортування. При подачі гранул льоду на вхід до компресора потрібно враховувати, щоб гранули спрямовувалися таким чином, щоб охоплювали лопатки компресора по всій їх висоті. Крім того, гранули льоду повинні мати достатній механічний імпульс для ефективного контакту із забрудненням на поверхні лопатки. Для цього подача гранул здійснюється двома форсунками з двох боків входу ОК (рис. А.2 та Додатку А). За умови неправильного напрямку потоку гранули льоду будуть битися о стінки вхідної частини і потрапляти в компресор без контакту з лопатками чи з мінімальним контактом.

Для ефективного розподілу гранул льоду пропонується використовувати гранули різного діаметру від 2...5 мм, такий діапазон розміру також дає можливість гранулам меншого діаметру потрапляти до вищих ступенів осьового компресору, що було теоретично досліджено, для більшості типів ГТУ, де розмір гранул льоду повинен бути не менше 2 мм, щоб забезпечити ефективний контакт з лопатками компресора [87]. Гранули меншого розміру не будуть мати достатнього імпульсу, і будуть проходити через компресор без ефекту очистки. Гранули підібраного

діаметру будуть подрібнюватись лопатками таким чином, що одна гранула зможе ударитися об лопатки декілька разів і досягати 5-6 ступеня, що підвищує ефективність очищення ОК і ГТУ у цілому.

Промивання проточної частини ГТУ рекомендується проводити через кожні 2900-3000 годин напрацювання ГПА, а також у випадках підвищеного «ковзання», або якщо температура газів після турбіни високого тиску у порівнянні з формулярними значеннями більша ніж на 30°C. Промивку проводять тільки після охолодження корпусу двигуна до температури 50-60°C. Гранули льоду подають до корпусу КНТ виконуючи послідовність, наведену у Додатку А.

Результати зазвичай показують, що відновлена вихідна потужність двигуна після промивання на ходу складає близько 0,5%, в той час як після очищення на холодному прокручуванні вона може досягати 2%, а в деяких випадках - до 5%, таке відновлення вихідної потужності, ККД сприяє тому, що окупність обладнання, при застосуванні технології очищення гранулами льоду, за рахунок більш ефективного очищення лопаток і напрямних апаратів ОК ГТУ, в порівнянні з існуючими способами миття ОК ГТУ (табл. 2.10), дозволить збільшити ККД і ефективну потужність ГТУ не менше 3% і 8% відповідно.

При проведенні очищення ОК на холодній прокручуванні особлива увага, в зв'язку з захистом навколишнього середовища, приділяється питанню про утилізацію стічних вод, що утворюються при очищенні з агрегату за допомогою дренажної системи. Застосування гранул льоду значно полегшує це завдання, так як відпрацьовану воду після промивки ГТУ можна скидати у загальну каналізацію, натомість зовсім інша ситуація з утилізацією стічних вод має місце при промиванні ОК ГТУ миючими розчинами очищувачів, заснованих на розчинниках. В такому випадку стічні води повинні збиратися в спеціальні контейнери і утилізуватися за методиками, що застосовуються для утилізації відпрацьованих олів [94, 95].

Таблиця 2.10 - Порівняння нової технології миття із застосуванням гранул льоду з існуючими способами миття ОК ГТ

№ п/п	Спосіб очищення	Ефективність очищення, (за рахунок виміру відношення приведеної ефективної потужності $N_e^{пр}$ до і після очистки), %	Періодичність очищення рекомендоване днів	Час очищення, год	Побічні ефекти
1	Промивка миючою рідиною з розчинниками	2,5	15-30	3-4	Утилізація в спеціальну каналізацію відпрацьованої рідини, корозія
2	Промивка миючою рідиною без розчинників	2,2	7-10	3-5	-
3	Очищення кісточковою крихтою	2,3-2,9	60-120	2-3	Забруднення пилом
4	Гранулами льоду	2,5-3,1	120-150	1-3	-

Покращення технічних характеристик експлуатованих ГТУ, за рахунок застосування високоефективної очистки дозволить знизити, в середньому, витрата паливного газу для ГТУ на 3%. За всіма ГТУ ДК "Укртрансгаз" економія витрат паливного газу може скласти до 350 мільйонів куб. метрів на рік. З урахуванням вартості природного газу (беремо 100 доларів за 1000 м<sup>3</sup>), економія від впровадження нової технології та обладнання, для експлуатанта ГТУ може скласти до 35 мільйона доларів на рік.

Процес експлуатації осьових ГТУ на газоперекачуючих станціях супроводжується негативним впливом на довкілля за різними чинниками, серед яких переважаючими є шум та викиди шкідливих речовин. Відхилення від оптимальних значень технічних характеристик ГТУ, в тому числі за рахунок

забруднення лопаток ОК ГТУ, зумовлює зростання і шуму, і емісії ЗР від ГТУ. Підтримання роботи ГТУ в оптимальному режимі можливе за рахунок періодичного очищення ОК від експлуатаційних забруднень в термін міжремонтних періодів експлуатації. Оптимальні параметри роботи ОК ГТУ, впливають на економічні показники роботи ГТУ за рахунок економії витрати паливного газу та підвищення екологічної безпеки довкілля.

Як показано вище, поступове забруднення лопаток ОК ГТУ призводить до зростання температури за турбіною низького тиску (ТНТ) та падіння обертів на турбіні високого тиску (ТВТ). Вплив промивання ОК ГТУ на температуру за ТНТ, показано на рис. 2.14 [78].

Забруднення направляючих лопаток ОК ГТУ під час експлуатації окрім зниження ККД і потужності ОК ГТУ, також впливає на емісію шкідливих викидів, зокрема оксидів азоту  $\text{NO}_x$  [124]. Зниження коефіцієнту надлишку повітря на 0.5% призводить до зростання викидів  $\text{NO}_x$  на  $20 \text{ мг/м}^3$  (див. рис. 2.15).

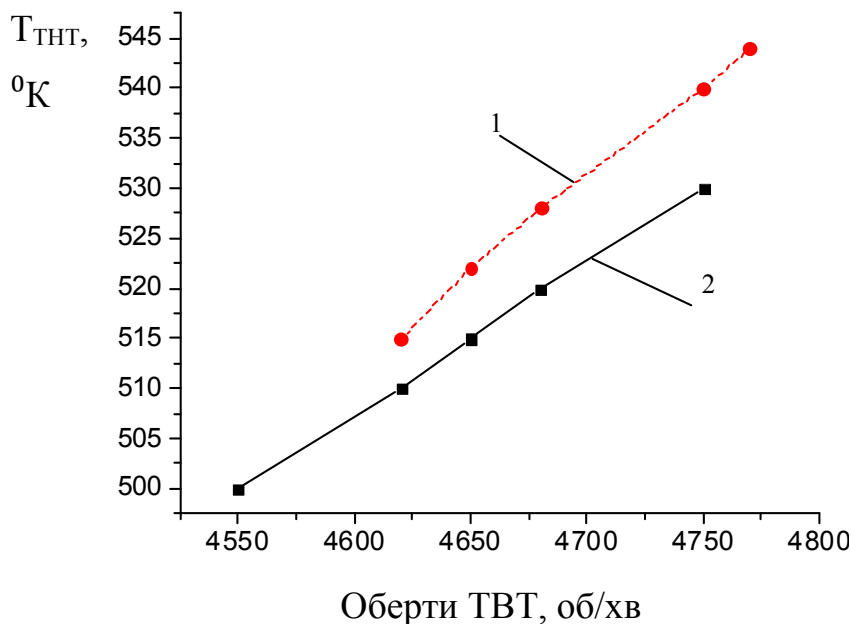


Рисунок 2.14 - Вплив промивання компресора на температуру за ТНТ: 1 – до промивання; 2 – після промивання

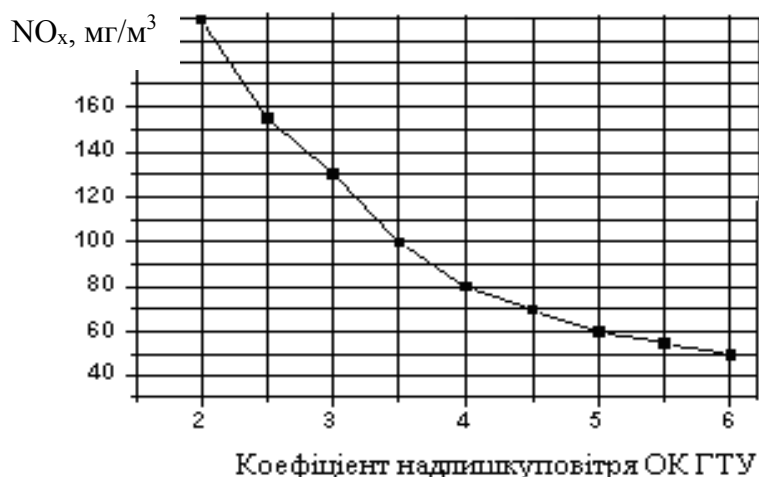


Рисунок 2.15 - Залежність зміння викидів NO<sub>x</sub> від коефіцієнта надлишку повітря ГТУ

Досвід експлуатації ГТУ різних типів показує, що помітне зниження робочих параметрів ОК, через експлуатаційне забруднення лопаток, відбувається приблизно через 1500–2000 год роботи. Характеристика зміни емісії шкідливих викидів від напрацювання ГТУ наведена на рис. 2.16, інтенсивне підвищення викидів ЗР відбувається в межах перших 2000 год. роботи ГТУ, тобто в період зниження ефективності роботи ОК ГТУ в результаті експлуатаційних забруднень.

Перевищення емісії NO<sub>x</sub> для ГТУ потужністю 10 МВт, у разі роботи ГТУ протягом 6000 год. (тобто під час роботи із забрудненим ОК) відносно граничного нормованого рівня емісії NO<sub>x</sub> для даного типу ГТУ (100 мг/м<sup>3</sup>) становить біля 20%, або сумарно 260 т викиду NO<sub>x</sub> за 6000 год. роботи, включаючи додаткові 52 т в результаті забруднення ОК і втрати його оптимальних характеристик.

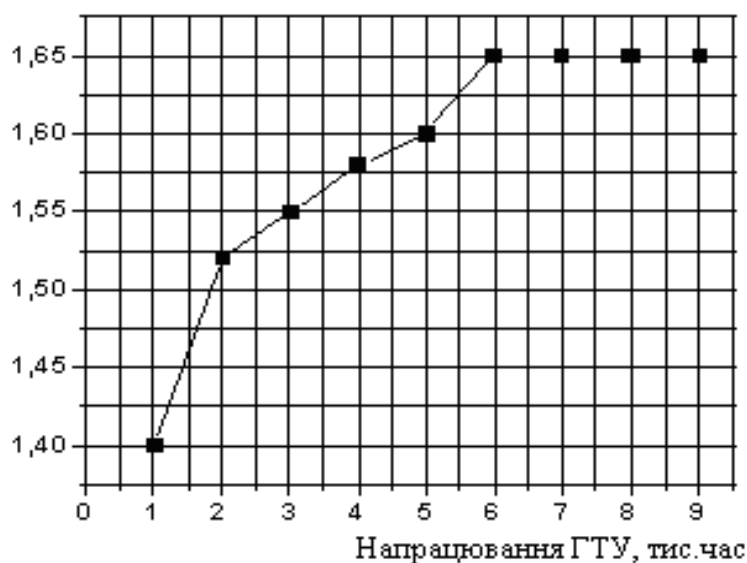


Рисунок 2.16 - Залежність збільшення індексу шкідливих викидів від напрацювання ГТУ



Таким чином, за рахунок періодичного очищення ОК ГТУ є можливість суттєвого зниження емісії викидів ЗР під час роботи ГТУ, що зумовлює зменшення забруднення довкілля під час експлуатації ГТУ на магістральних газопроводах [78]. Окрім періодичного очищення ОК ГТУ, актуальним є створення постійно діючого моніторингу параметрів експлуатації ГТУ за єдиною методикою, розроблення та впровадження комплексу необхідних заходів. До них слід віднести наступні:

- проведення екологічної експертизи і за її результатами створення енерго-екологічного паспорту;
- розроблення і впровадження моніторингу екологічних характеристик протягом експлуатації ГТУ на основі нормативно-правової бази;
- розроблення положень аналізу стану експлуатації ГТУ на відповідність сучасним вимогам з екологічної безпеки України, а також вимогами Директив та Регламентів Європейського співтовариства;
- модернізація вже існуючого технологічного обладнання та розроблення нових установок, наприклад для оброблення поверхонь направляючих лопаток ОК ГТУ гранулами аморфного льоду в існуючій технології очищення [78].

Реалізація запропонованих заходів дозволить забезпечити зменшення забруднення довкілля під час експлуатації ГТУ.

## **2.6. Паливо з біомаси на основі опалого листя**

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 олив на ГТУ ГПА КС та опалого листя міст, яке за своїми властивостями і складом представляє інтерес як сировина для нових продуктів і інгредієнтів паливних матеріалів [96]. Відходи відпрацьованих нафтопродуктів використовувались переважно ті, які не регенеруються для збільшення калорійності та якісного формування палива [98].. На основі сировини з опалого листя розроблено технологію, яка дозволяє виготовляти брикети для використання в

топках. Для збільшення калорійності палива з опалого листя виготовляють композиції з різними горючими домішками для порівняння. Зразки виготовляють на основі паливних композицій, які містять у своєму складі опале листя, домішки та зв'язуючий - полівініловий спирт або відходи нафтопродуктів. Ступінь полімеризації полівінілового спирту  $(-CH_2-CH(OH)-)_n$  може досягти 5000. Для дослідження виготовлялись зразки (циліндри розміром  $10 \times 10$  мм). Ці зразки мають пористість, яка необхідна для ефективного згоряння палива, а механічні характеристики міцності дозволяють транспортувати паливо, не пошкоджуючи його структуру. Фізико-хімічні властивостей палива з біомаси на основі опалого листя з домішкою відходів нафтопродуктів наведено у табл. 2.11.

Визначено екологічні властивості нових паливних брикетів, зразки палива під час згоряння має 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 та наповнювачів під час його використання як сировини для виготовлення паливних брикетів. На основі аналізу економічних і технічних показників зроблено висновок щодо доцільності вироблення брикетів, а не пілетів. На підставі результатів аналізу існуючих варіантів обладнання для перероблення відходів з біомаси, а також власних результатів досліджень [100], обрано таку схему лінії з перероблення опалого листя: приймання сировини; склад сировини; сепаратор; подрібнювач-сушильня аеродинамічної дії (диспергатор); змішувач-аератор; прес для формування брикетів; обладнання для фасування.

Таблиця 2.11 - Фізико-технічні властивості палива з біомаси

Параметри	Норма	Методи випробування
Зовнішній вигляд	Брикеті бурого кольору з маслянистою поверхнею	Візуально
Пористість, %	16–18	ГОСТ 19592–80
Щільність, г/см <sup>3</sup>	1,09–1,13	ГОСТ 19592–80
Міцність стискання, кг/см <sup>2</sup>	24–30	ГОСТ 19592–80

Аналіз результатів досліджень з перероблення опалого листя в паливо свідчить, що промислове використання розробленої технології перероблення опалого листя в паливо дозволить вирішити проблеми поліпшення стану довкілля за рахунок утилізації опалого листя, а також використовувати новий вид палива як для побутових умов, так і для промисловості, наприклад, як домішки до основного палива для котельних установок підприємств і ТЕС.

## **Висновки по Розділу 2**

1. Аналіз опублікованих праць вітчизняних та зарубіжних авторів, а також результати проведених досліджень забруднення ОК ГТУ ГПА показують, що в найбільше забруднюються лопатки перших 4-5 ступенів. Ступінь забруднення лопаток зменшується уздовж проточної частини по ходу потоку повітря, яке попадає в ОК. Також слід відзначити, що лопатки ВНА, а також робочі та направляючі лопатки першого ступеню мають більшу кількість забруднення на випуклій стороні профілю, ніж на вогнутій, натомість ступені з другої по п'яту, мають однакову ступінь забруднення, як на вогнутій так і на випуклій стороні.

2. Проведений аналіз показав, що пріоритетним напрямком підвищення енергетичної ефективності роботи ОК ГТУ ГПА без виведення його в ремонт є проведення періодичного очищення проточної частини осьового компресора.

3. На підставі аналізу проведених досліджень зразків відкладень, що утворюються на лопатках ОК в процесі експлуатації ГТУ, розроблений новий спосіб очищення гранулами аморфного льоду, очистка яким дозволить збільшити ККД і ефективну потужність ГТУ не менше 3% і 8% відповідно.

4. Визначене направлення щодо поліпшення системи очистки ОК та оптимальний період між очищеннями проточної частини ГТУ. Виходячи з результатів дослідження забруднень лопаток, доцільно оснастити ГТУ системами промивки ОК на різних режимах, на ходу та на холодній прокрутці, рекомендується використовувати гранули льоду різного діаметру.

5. Оптимальний період між очищеннями проточної частини осьових компресорів ГТУ становить 120-150 діб. Періодичне очищення проточної частини ОК ГТУ дозволить:

- збільшити напрацювання практично без втрати потужності;
  - скоротити питомі витрати палива і знизити теплову потужність;
  - знизити пошкодження і вібрації лопаток ротора;
  - скоротити витрати на заміну/відновлення компонентів проточної частини двигуна.
- знизити викиди  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_2$  та шумового навантаження.

6. Розроблена експериментальна установка для отримання гранул льоду та очищення поверхонь (патенти № 131499, від 25.01.2019 та № 148371, від 28.07.2021 [101, 102]).

7. Розроблені зразки палива з композицій опалого листя та відходами нафтопродуктів, що дозволяють провадити утилізацію відпрацьованих олив на ГТУ ГПА КС та опалого листя (патент №52029 від 10.08.2010р. [103]).

8. Використання фільтрату (водної витяжки) з опалого листя можна використовувати, як інгредієнти для різних спецрідин, таких як теплоносії чи протигололідні рідини (патенти на такі № 65016, від 25.11.2011. Бюл. №54 [104]).

### 3. ВИМІРЮВАННЯ РІВНІВ ЗВУКУ ДЛЯ ШУМУ КОМПРЕСОРНОЇ СТАНЦІЇ

До істотних переваг ГПА з газотурбінним типом приводу слід віднести насамперед високу питому потужність на одиницю маси; можливість регулювання об'єму подачі газу за рахунок зміни частоти обертання силової турбіни; можливість використання газу, що перекачується у вигляді технологічного енергетичного ресурсу; відносно мала питома витрата води і олів для роботи ГПА порівняно, наприклад, з поршневими двигунами внутрішнього згоряння. Використання ГТУ на магістральних газопроводах відкриває великі можливості для надійної автоматизації виробничого процесу та зниження числа робочого персоналу КС.

Серед недоліків ГТУ одним з найбільш несприятливих слід зауважити на акустичний шум [21, 27]. У ГТУ компресорних станцій ГТС інтенсивний шум виникає в системі всмоктування повітря і вихлопу газів, у вентиляторі системи охолодження, в корпусі турбомашини і в генераторі. Тому захист персоналу КС від шумового впливу є досить актуальною проблемою, вона вирішується комплексом заходів відповідно з економічною доцільністю і технічними можливостями газотранспортної системи. В частині забезпечення вимог гігієни праці набули поширення різні методи зниження шкідливого впливу шуму на робочих місцях персоналу, серед них найбільш ефективним є зниження шуму в джерелі його виникнення [21, 25, 27]. Наявні рівні звукової потужності випромінювання шуму поширених ГПА значно перевищують діючі гранично допустимі рівні, закріплені санітарними нормами. Найбільш гучними є ГТУ, які обладнані ГПА з газотурбінним приводом (нагнітачі і редуктори).

Виявлено залежності умов шуму на виробничому майданчику та у довкіллі від рівня звукової потужності ГПА, встановленої потужності ГТУ, звукової потужності турбокомпресора, терміну служби ГПА, кількості одночасно працюючих ГПА, характеристик виробничих приміщень, конструктивного виконання ГПА, стану засобів поглинання шуму ГПА [21, 27]. Але запуск в експлуатацію нових, більш потужних КС, на яких встановлені агрегати ГТК-10, ГТК-16, ГТК-25, а також ГПА на базі авіаційних і суднових двигунів, істотно порушив рівновагу навколишнього

середовища [106]. Акустичні обстеження об'єктів ГТС показують, що на тлі поліпшення шумових характеристик основних джерел шуму - ГПА - істотним, а іноді і домінуючим стає внесок допоміжного обладнання (апарати повітряного охолодження газу, запірні апаратура, системи газоповітряних скидів та ін.) у загальне шумове поле КС. Основною причиною виникнення вібрації і шуму в цьому випадку є турбулентність і вихровий характер перебігу газу в трубопроводах, регуляторах тиску і клапанах (Розділ 1). До числа основних джерел шуму, що визначають шумовий режим на промисловому майданчику КС і прилеглий до неї території, відносяться ГПА, системи технологічних скидів газу з контурів нагнітача, паливного та пускового газу ГПА, а також лінійних частин КС [106]. Дослідження акустичних джерел шуму окремих ГПА та КС у цілому залишається актуальною проблемою, яка вимагає подальших акустичних вимірювань для оцінки внеску провідних джерел шуму КС в акустичне поле на території та навколо станції, так і самих умов розповсюдження звуку у довкіллі.

### **3.1. Об'єкт інструментального дослідження шуму компресорної станції**

Вимірювання рівнів звуку для шуму КС в натурних умовах проведені на базі КС в м. Золотоноша (рис. 3.1), що складається з трьох ГПА типу ГТН-25И (в основу ГПА покладена двовальна ГТУ MS 5352 виробництва Дженерал Електрик, США - ГТУ цієї фірми виготовляються на різних заводах світу: АЕГ-Каніс, Німеччина, Ново-Піньон, Італія, Джон Браун, Великобританія, Міцубісі, Японія) з нагнітачами типу РС-L1001-40 (виробництво Ново-Піньон, Італія).

Спрощений вигляд ГПА-25 наведено на рис. 3.2. ГТУ розміщується всередині окремої будівлі, системи всмоктування повітря та витоку (вихлопу) газів, що відпрацювали, обладнані окремими шахтами з автономними системами очищення повітря (що подається на вхід в ГТУ) та газів відповідно. На рис. 3.3 можна побачити, що зона безпеки навколо КС витримується – на відстані 700 м від межі (огорожі) території станції житлова забудова відсутня, виконується тільки діяльність на навколишніх землях за сільськогосподарським призначенням. Рівні звукової потужності (РЗП) випромінювання шуму від основних акустичних джерел ГПА

ГТН-25И є дослідженими і вони наведені в каталозі шумових характеристик [107] – табл. 3.1.

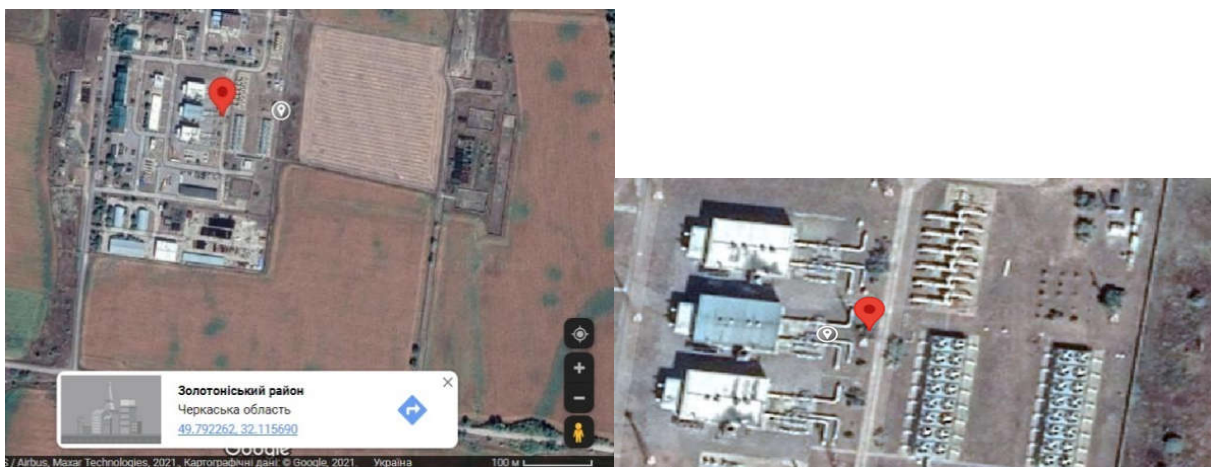


Рисунок 3.1 - Територія компресорної станції в м. Золотоноша (Google-map)

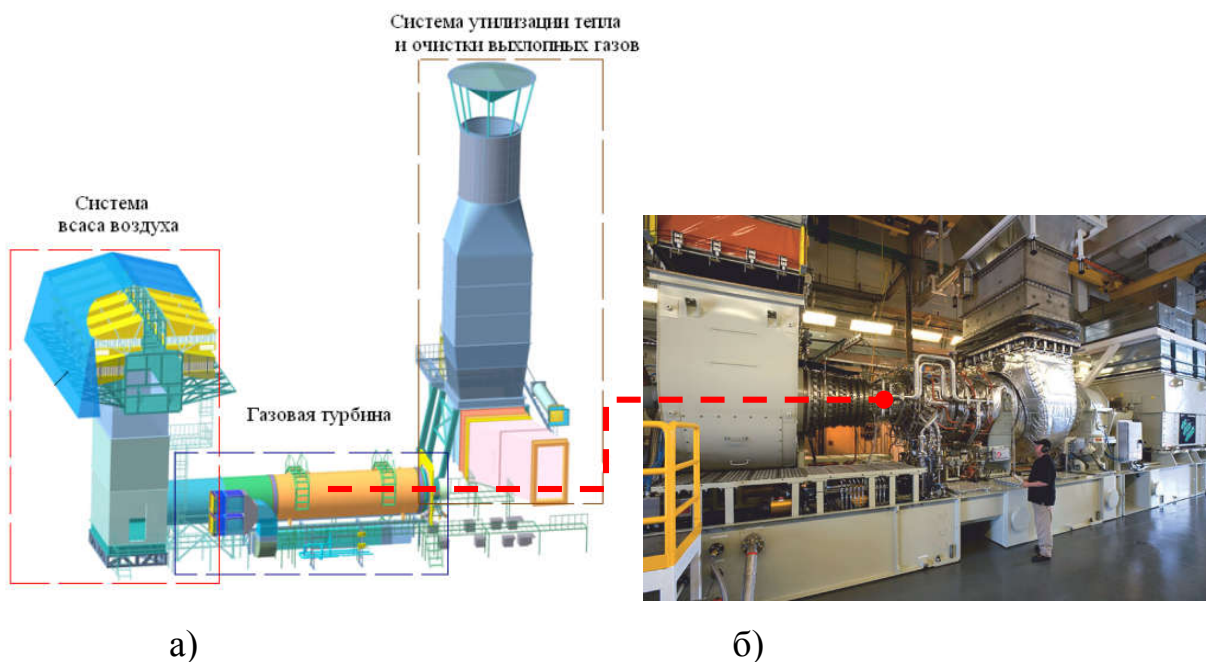


Рисунок 3.2 - ГПА-25: а) загальний вигляд(виробництва ТОВ «Волга-Авіагаз»); б) вигляд всередині укриття («Ладога» виробництва Невський завод)

Вимірювання рівнів звуку (РЗ) та звукового тиску (РЗТ) виконані в точках, що наведені на рис. 3.4 (а – на території КС, б – поза територією КС). Під час акустичних вимірювань на КС в роботі знаходився тільки один ГПА (рис. 3.5), тому була використана дана можливість виконати вимірювання з виділенням окремих основних джерел шуму ГПА: шахти випуску газів, що відпрацювали (рис. 3.5б, точки 4'-11' на рис. 3.4), шахти всмоктування повітря в КТУ (рис. 3.6а), технологічної обв'язки ГПА (рис. 3.6б). Окремо виконані заміри РЗ та РЗТ всередині

будівлі ГПА (точка 3 на рис. 3.4) та збоку від будівлі (точка 4 на рис. 3.4). Координати точок вимірювання і їх призначення наведені в табл. 3.2.

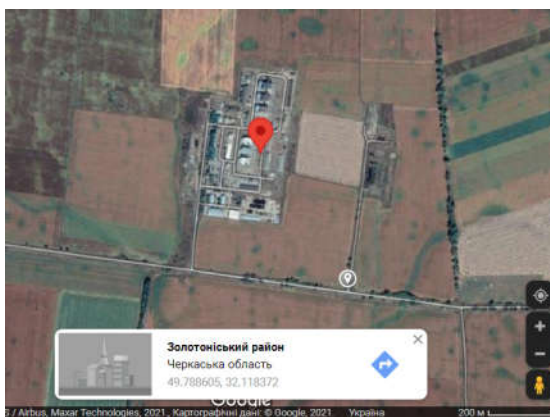


Рисунок 3.3 - Територія КС в м. Золотоноша з витриманням вимог охоронної зони навколо станції радіусом 700 м (Google-map)

Таблиця 3.1 - Октавні РЗП основних джерел шуму ГПА ГТН-25И з каталогу [107]

Тип агрегату	Висота джерела шуму на земною поверхнею, м	РЗП, дБ, в октавних смугах частот, Гц									Коригований РЗП, дБА
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Шахта витоку газів (табл. 2[107])	9	108	106	105	101	98	99	95	86	74	104
Шахта всмоктування (табл. 3[107])	5	98	98	96	105	99	96	91	83	75	106
Нагнітач PCL 1002/40 (аналог з каталогу Н 370-18-2) (табл. 4[107])	2,5	100	108	107	109	108	115	112	104	92	117
Технологічна обв'язка нагнітача (табл. 5[107])	1,5	112	111	108	110	109	115	116	109	98	121
Турбоблок ГПА в індивідуальному укритті (табл. 10[107])	2,5 (9)	115	114	113	115	115	117	96	106	96	122
Шум ГПА у цілому (табл. 11 [107])		116	112	110	112	100	115	116	109	98	121





а)



б)

Рисунок 3.4 - Точки вимірювання рівнів звуку та звукового тиску навколо ГПА-25И на КС Золотоноша: а) на території КС, б) поза територією КС



а)



б)

Рисунок 3.5 - Акустичні вимірювання на території КС навколо ГПА, що знаходився роботі: а) в точці 5 на рис. 3.4; б) в точці 4' на рис. 3.4



а)



б)

Рисунок 3.6 - Акустичні вимірювання на території КС навколо ГПА, що знаходився роботі: а) в точці 2 на рис. 3.4; б) в точці 10 на рис. 3.4

Таблиця 3.2 - Координати точок вимірювання шуму від ГПА і їх призначення

Номер точки	Призначення точки вимірювання	Координати точки	Номери файлів запису шуму	Відстань до джерела, м
1	Біля торця будівлі ГПА і шахти всмоктування повітря	49.79202, 32.11345	(f35,f49)	1-3
2	Збоку будівлі ГПА і шахти всмоктування повітря	49.79207, 32.11349	(f36,f50)	1-3
3	Всередині будівлі, на відстані 2 м від ГТУ	49.79201, 32.11378	(f37,f51)	2
4	Ззовні будівлі, симетрично до точки 3	49.7921, 32.1138	(f38,f52)	2-3
5	Проміжна точка між точками 4 і 6	49.79172,32.11455	(f39,f53)	50
6	На межі території КС (були завади від шуму бензокосилки, тому скорочений час запису)	49.79151,32.11549	(f40,f54) 2 хв. (f41,f55)3 хв.	125
7	На межі території КС - проміжна точка між точками 5 і 9		(f42,f56)	150
8	Уздвож дороги	49.78877,32.11244	(f43,f57)	350
9	Уздвож дороги	49.78861,32.11843	(f44,f58)	480
10	Між трубами технологічної обв'язки	49.79191,32.11428	(f45,f59)	1-3
11	Торець біля охолоджувачів	49.79203,32.11447	(f46,f60)	50

Основними акустичними джерелами ГПА, в тому числі ГПА-25И, є турбокомпресор (рис. 3.7), нагнітач (рис. 3.8) та технологічна обв'язка ГПА (рис. 3.6б). Турбокомпресор (ГТУ) розміщується на індивідуальному фундаменті (рис. 3.2б), в окремій будівлі (укриття), через шахти всмоктування повітря та витоку газів, що відпрацювали, він зв'язаний з навколишнім середовищем. Тому для шуму довкілля має значення шум, що випромінюється через шахти всмоктування повітря та витоку газів.

Вимірювання виконувались у сприятливих погодних умовах: температура повітря 23,8 °С, тиск 752 мм.рт.ст., вологість повітря 74%, вітер 1 м/с – близько до умов штилю. Тобто, за таких показників вплив метеорологічних умов на результати вимірювання РЗ та ЗЗТ шуму акустичних джерел ГПА можна вважати відсутнім [108, 109].



Рисунок 3.7 - Турбокомпрессор ГПА-25

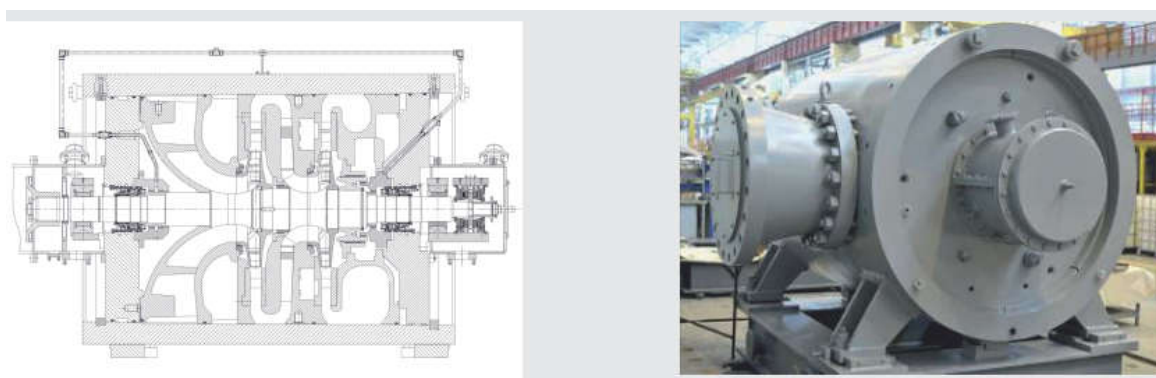


Рисунок 3.8 - Нагнітач ГПА-25

Вимірювання РЗ та РЗТ і запис шуму ГПА в точках виконувався протягом одного робочого дня. 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 наступні: сумарний РЗТ, спектральні в октавних та третино-октавних смугах частот в діапазоні 20 Гц – 20кГц. Запис акустичного шуму дозволив виконати більш детальний акустичний аналіз в лабораторних умовах відповідно до вимог стандартів [108-110].

### 3.2. Рівні звуку від випромінювання шуму ГПА на території КС

Основні результати вимірювання та лабораторного аналізу рівнів звуку та рівнів звукового тиску основних акустичних джерел ГПА ГТН-25И наведені у Додатку Б. У розділі наводяться результати аналізу проведених експериментальних досліджень.

### 3.2.1. Рівні звуку від випромінювання шуму ГТУ через стінку укриття

РЗ шуму ГТУ всередині укриття ГПА ГТН-25И (точка 3) наведені на рис. 3.9, їх основні величини визначені і наведені в табл. 3.3. Відповідно до вимог стандарту та санітарних правил шум ГТУ слід вважати *стаціонарним*. Спектральні третино-октавні РЗТ шуму ГТУ, визначені щосекундно протягом періоду запису 5 хв., наведені на рис. 3.10. Спектри підтверджують стаціонарний характер джерела шуму, що досліджується. Характер спектру шуму ГТУ ззовні (рис. 3.11) укриття ГПА-25И відповідає основним спектральним характеристикам шуму турбокомпресора всередині укриття (рис. 3.10) – наявні вузькосмугові складові випромінювання шуму в межах смуг 80, 315-500 і 2500 Гц.

Таблиця 3.3 - РЗ шуму ГТУ всередині укриття ГПА-25И (точка 3 на рис. 3.4 і в табл. 3.1)

Виміряна величина	$L_{Apeak}, dBA$	$L_{AE}, dBA$	$L_{AFmax}, dBA$	$L_{AFmin}, dBA$	$L_{Aeq}, dBA$
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

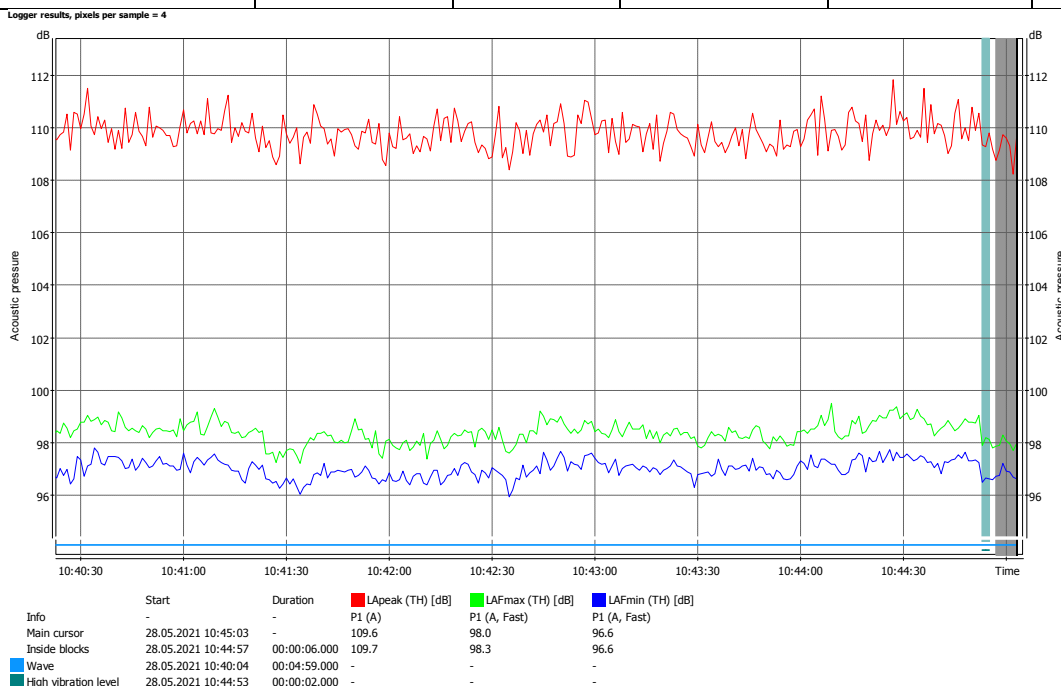


Рисунок 3.9 - РЗ шуму ГТУ всередині укриття ГПА-25И (точка 3 на рис. 3.4 і в табл. 3.1)



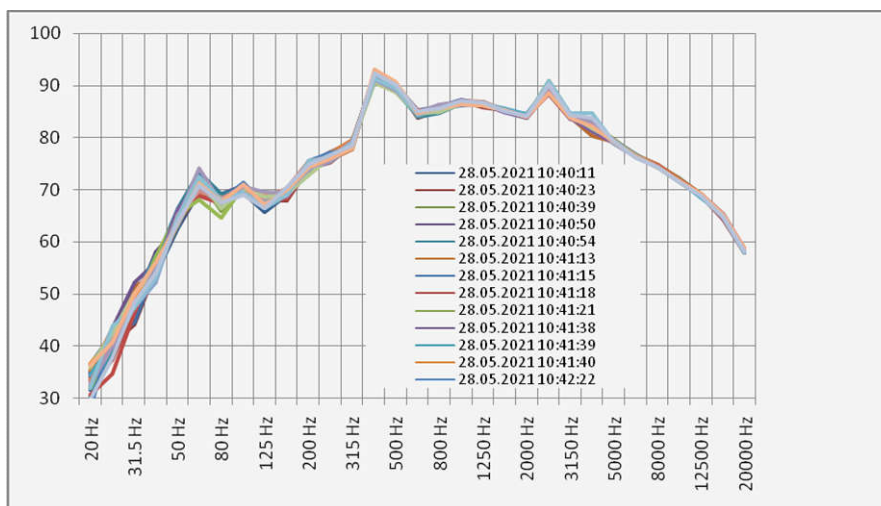


Рисунок 3.10 - Третино-октавні РЗТ шуму ГТУ в середині укриття ГПА: масив спектрів шуму в моменти часу, коли поточне  $P_z(t)$  дорівнює середньому значенню за період запису шуму установки

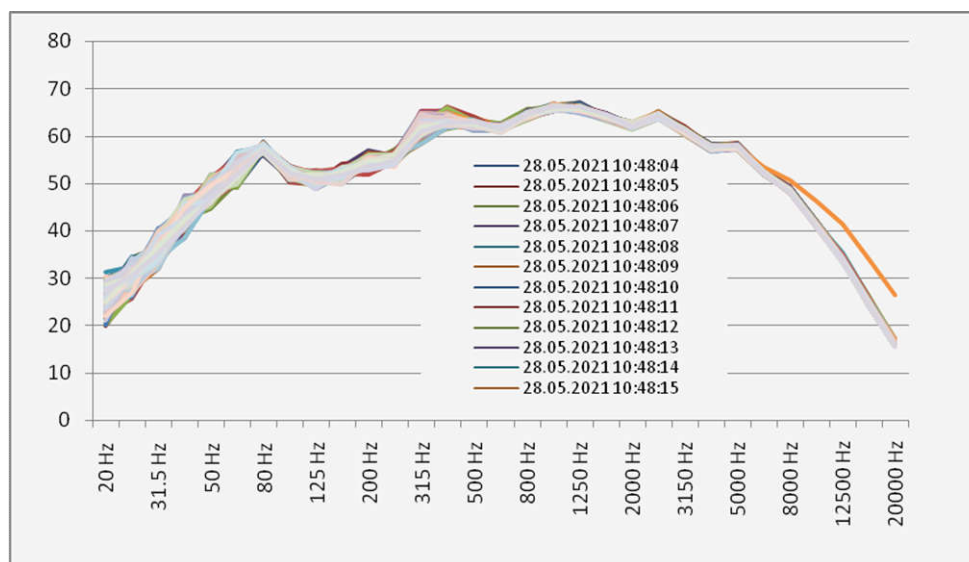
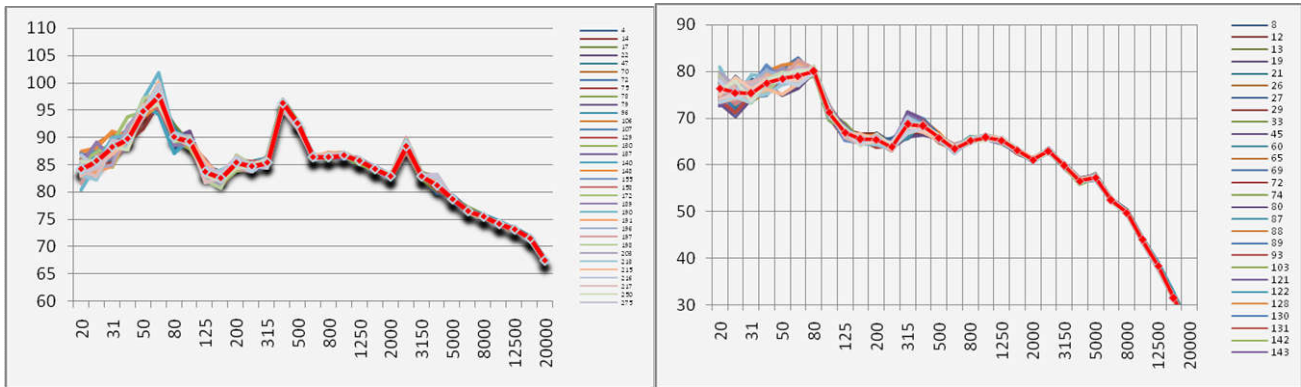


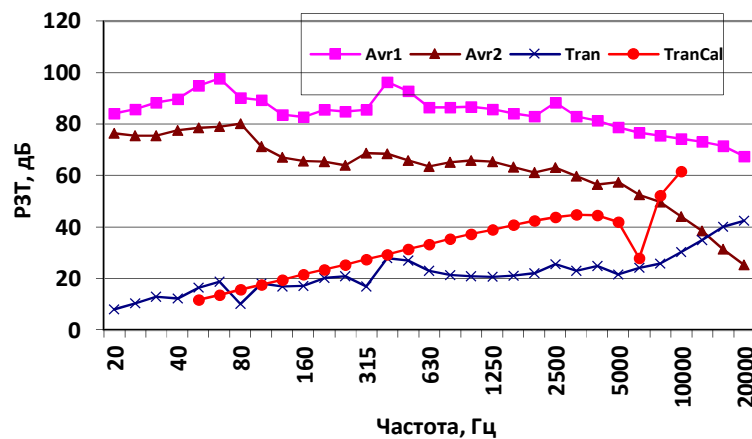
Рисунок 3.11 - Третино-октавні РЗТ шуму ГТУ ззовні укриття ГПА: наведений масив щосекундних спектрів шуму протягом періоду запису шуму установки спектрів шуму в моменти часу, коли поточне  $P_z(t)$  дорівнює середньому значенню за період запису шуму установки

Скориговані спектри РЗТ наведені на рис. 3.12: спектри на рис. 3.12а відповідають масиву спектрів на рис. 3.10; спектри на рис. 3.12б відповідають масиву спектрів на рис. 3.11; на рис.3.12в наведена різниця усереднених спектрів РЗТ, виміряних в точках 3 і 4, яка в основному визначається характеристиками звукоізоляції огорожувальних конструкцій укриття ГПА (ангарного типу, у повній блоковій заводській готовності).



а)

б)



в)

Рисунок 3.12 - Скориговані третино-октавні РЗТ шуму ГТУ всередині (Avr1) та ззовні (Avr2) укриття і їх різниця (Tran), спектральні РЗТ усереднені протягом періоду запису шуму установки: а) усереднення скоригованого РЗТ шуму ГТУ всередині укриття (нескориговані спектри РЗТ наведені на рис. 3.10); б) усереднення скоригованого РЗТ шуму ГТУ ззовні укриття (нескориговані спектри РЗТ наведені на рис. 3.11); в) різниця усереднених спектрів РЗТ ззовні та в середині укриття Tran, обчислені значення звукоізоляції для стандартної панелі TranCal

Укриття ГПА виконується у вигляді одного виробничого приміщення і представляють собою збірні каркасні будівлі з металевих конструкцій і легких огорожувальних елементів (сендвіч-панелей), з нанесенням покриття на елементах конструкції ґрунтовими фарбами і антикорозійними лаками. Каркас укриття металевий (марки сталі відповідно до вимог СП 16.13330.2011).

Укриття розділене газонепроникної перегородкою на два приміщення – ГТУ і компресора-нагнітача, обладнане вантажопідйомними кранами, системами опалення, вентиляції, електроосвітлення, автоматичного пожежогасіння. Стіни і перекриття виконані з тришарових панелей (з панелей типу «сендвіч», зовнішні листи сталеві товщиною 0,5мм, всередині наповнення негорючим мінеральним теплостійким матеріалом з базальтового волокна). Закладення отворів для пропуску технологічних комунікацій через будівельні конструкції, забезпечує надійний захист від проникнення шуму у навколишнє середовище. Різниця усереднених спектрів РЗТ шуму КТУ всередині і ззовні укриття (рис. 3.12в) більшою мірою обумовлене звукоізоляційними властивостями стінок укриття [111-113].

Як правило, спеціальні заходи із зниження РЗ для шуму всередині укриття не передбачаються із-за відсутності в ньому постійних робочих місць. Застосування двошарових або тришарових сендвіч-панелей в якості огорожувальних елементів (з підвищеною теплоізоляцією та помірною звукоізоляцією) спрямоване на незначне зниження РЗ від ГПА за межами укриття [114, 115].

### **3.2.2. Рівні звуку від шахти всмоктування повітря ГПА**

Рівні звуку шуму у довкіллі від шахти всмоктування повітря ГПА утворюються, в основному, роботою осьового компресора ГТУ. Дане комплексне акустичне джерело відноситься до провідних джерел шуму ГПА у цілому (табл. 3.2). Тому його експериментальне дослідження (в натурних умовах) з метою визначення внеску у загальне акустичне поле шуму ГПА є очевидним. Вимірювання шуму від шахти всмоктування повітря виконано в декількох точках (позначення точок на рис. 3.4): 1 та 1' – з торця укриття (рис. Б.5а), та біля рогу торцевої стіни укриття – 2 і 2' (рис. Б.5б).

Скориговані спектри РЗТ наведені на рис. 3.13: спектри відповідають масиву спектрів з РЗ, що дорівнює усередненому РЗ шуму протягом часу запису. Штриховою лінією наведені обчислені спектральні РЗТ шуму від шахти всмоктування повітря ГПА-25И за моделлю, що наведена у розд. 4 дисертації, для дистанції 1 м та 3 м між мікрофоном та основою шахти всмоктування повітря (окремо результати обчислення наведені на рис. 3.14, в тому числі наведені

обчислені для даного випадку ефекти впливу земної поверхні  $d\_later$  – результати інтерференції прямої та відбитої звукових хвиль від земної поверхні, в даному випадку – асфальтове покриття).

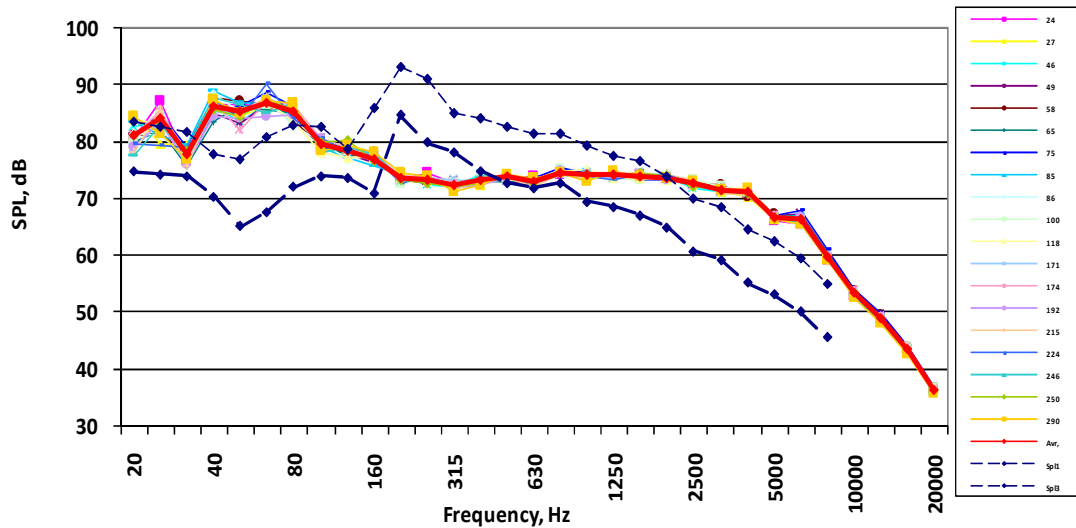


Рисунок 3.13 - Скориговані третино-октавні РЗТ шуму від шахти всмоктування повітря ГПА-25И (точка 1 на рис. 3.4 і в табл. 3.2): штриховою лінією наведені обчислені спектральні РЗТ шуму, червоною лінією наведені усереднені виміряні спектральні РЗТ шуму

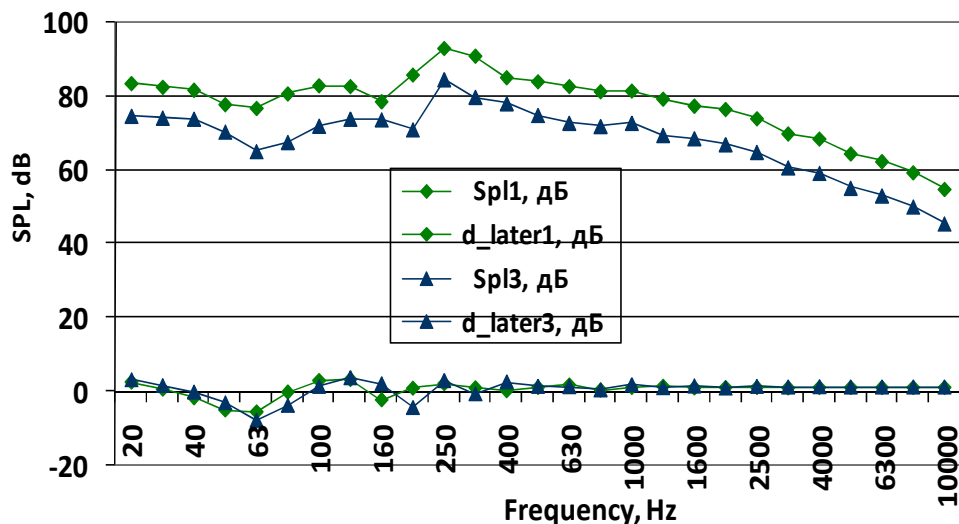


Рисунок 3.14 - Обчислені третино-октавні РЗТ шуму від шахти всмоктування повітря ГПА-25И та ефекти земної поверхні для дистанцій 1 і 3 м від гирла всмоктування повітря (точка 1 на рис. 3.4 і в табл. 3.2)



Скориговані спектри РЗТ від шахти всмоктування повітря ГПА-25И (точка 1') наведені на рис. 3.15: спектри відповідають масиву спектрів з РЗ, що дорівнює усередненому РЗ шуму протягом часу запису. Штриховою лінією наведені обчислені спектральні РЗТ шуму від шахти всмоктування повітря ГПА-25И для дистанції 1 м та 3 м між мікрофоном та основою шахти всмоктування повітря (подібно до наведених на рис. 3.13 та 3.14).

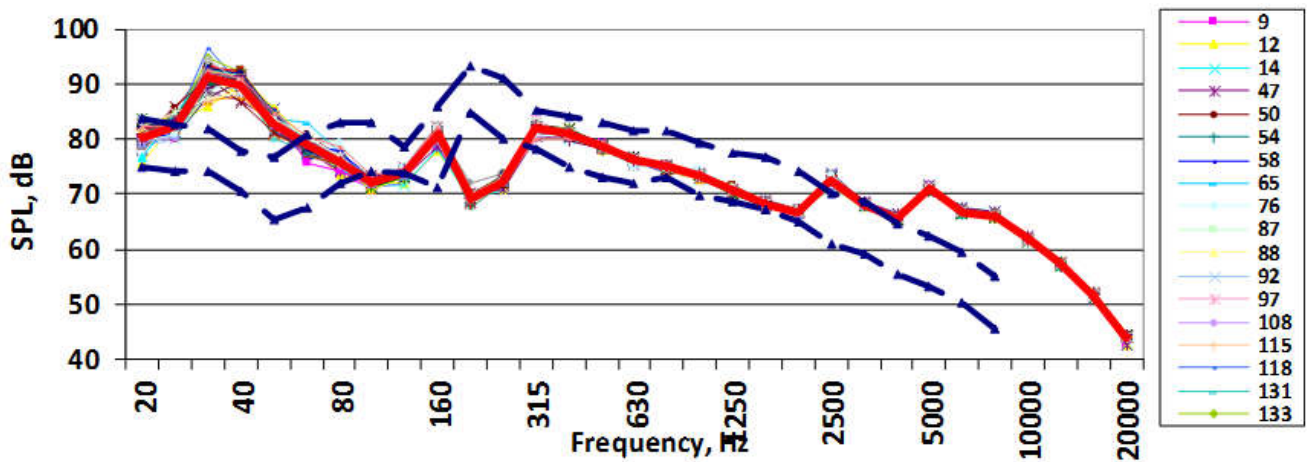


Рисунок 3.15 - Обчислені третино-октавні РЗТ шуму від шахти всмоктування повітря ГПА-25И (точка 1' на рис. 3.4 і в табл. 3.2): штриховою лінією наведені обчислені спектральні РЗТ шуму, червоною лінією наведені усереднені виміряні спектральні РЗТ шуму

Подібно до точки 1' виміряні та оброблені РЗ та РЗТ шуму в точках 1, 2 і 2'. Усереднені виміряні спектри РЗТ для точок 1 і 1' – з торця укриття та 2 і 2' – біля рогу торцевої стіни укриття наведені на рис. 3.16: спектри відповідають масиву спектрів з РЗ, що дорівнює усередненому РЗ шуму протягом часу запису. Штриховою лінією наведені обчислені спектральні РЗТ шуму від шахти всмоктування повітря ГПА-25И для дистанції 1 м та 3 м між мікрофоном та основою шахти всмоктування повітря (подібно до наведених на рис. 3.14 та 3.15).

В роботі обчислена міра оцінки відповідності застосованої акустичної моделі (яка обґрунтована і наведена у розділі 4 дисертації) результатам вимірювання, яка використана у формі індексу відповідності виду [116]:

$$d_2 = 1 - \frac{\sum_j \left( |SPL_{pj} - SPL_{oj}|^2 \right)}{\left[ \sum_j \left( |SPL_{pj} - \overline{SPL}_o| + |SPL_{oj} - \overline{SPL}_o| \right) \right]^2}; \quad \overline{SPL}_o = \sum_j SPL_{oj} / 24 \quad (3.1)$$

де  $SPL_o$ ,  $SPL_p$  - виміряні і розраховані (модель по-елементного внеску характерних акустичних джерел в сумарне поле шуму окремої ГПА або КС у цілому) спектри РЗТ досліджуваного джерела. Також як і функція когерентності  $\gamma$  [117, 118], індекс відповідності  $d_2$  змінюється в межах [0...1] причому чим ближче  $d_2$  до 1, тим більше модель відповідає експериментальним спостереженням.

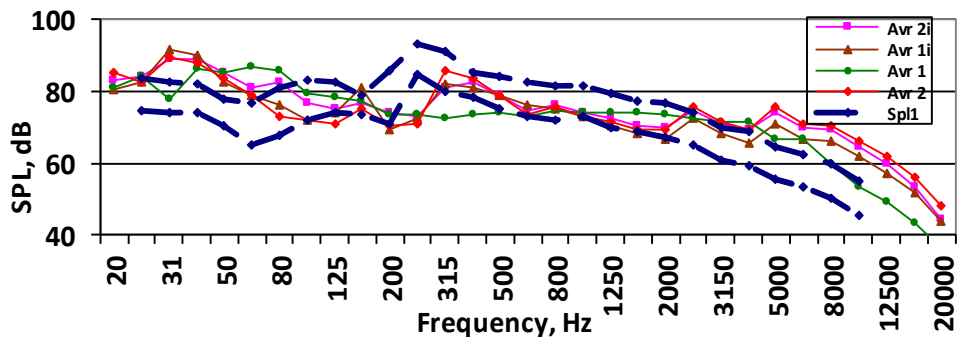


Рисунок 3.16 - Обчислені та усереднені виміряні третино-октавні РЗТ шуму від шахти всмоктування повітря ГПА-25И (точки 1, 1', 2 і 2' на рис. 3.4 і в табл. 3.2): штриховою лінією наведені обчислені спектральні РЗТ шуму, червоною лінією наведені усереднені виміряні спектральні РЗТ шуму

Для наведеного результату на рис. 3.16 індекс відповідності  $d_2$  для відстані 1м обчислений  $D2= 0.78816E+00$ , а для відстані 3м обчислений  $D2= 0.78034E+00$ , тобто обчислювальна модель є адекватною до результатів вимірювання. Середнє відхилення для даних відстаней  $MAE = 0.470833E+01$  і  $-0.480000E+01$  відповідно вказує на те, що результати обчислення і вимірювання знаходиться ближче один до одного для відстані 2 м, що підтверджено обчисленнями індексу відповідності:  $D2= 0.884E+00$ .

### 3.2.3 Рівні звуку від шахти витоку газів ГТУ, що відпрацювали

Рівні звуку шуму у довкіллі від шахти витоку газів ГТУ, що відпрацювали, утворюються, в основному, роботою турбіни та струменем газів з вихідного сопла ГТУ. Дане комплексне акустичне джерело є одним з провідних, тому його експериментальне дослідження з метою визначення внеску у загальне акустичне поле шуму ГПА є очевидним. Вимірювання шуму від шахти витоку газів ГТУ виконано в декількох точках 4'-11': від рогу торцевої стінки укриття і шахти всмоктування (рис. Б.14а); від бокової стіни укриття (рис. Б.14б); від рогу торцевої стінки укриття і технологічної обв'язки (рис. Б.14в). Відповідно до вимог стандарту та санітарних правил шум від шахти витоку газів ГТУ слід також вважати стаціонарним.

Скориговані спектри РЗТ, заміряні точка 4'-8' (на рис. 3.4 і в табл. 3.2), наведені на рис. 3.17: спектри відповідають масиву спектрів з РЗ, що дорівнює усередненому РЗ шуму протягом часу запису. Штриховою лінією 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 (окремо результати обчислення наведені на рис. 3.18, в тому числі наведені обчислені для даного випадку ефекти впливу земної поверхні  $d_{later}$  – результати інтерференції прямої та відбитої звукових хвиль від земної поверхні, в даному випадку – асфальтове покриття). Відмінність між виміряними і усередненими спектрами (рис. 3.17) шуму від шахти витоку газів ГПА-25И майже відсутня, тому як ГПА працює в стаціонарних умовах, є стаціонарним джерелом шуму, впливи довкілля на поширення звукових хвиль на відстанях вимірювання шуму від джерела також незначні. Зокрема на рис. 3.19 наведено обчислений ефект впливу земної поверхні  $d_{laterX\_Y}$  для оцінки РЗТ шуму від шахти витоку газів ГПА-25И (точка 4'-8', висота джерела 9 м, висота приймача 1,5 м) для двох значень ефективного опору потоку  $\sigma = 10000$  і  $20000$  кПа/с/м<sup>2</sup> для відбиваючої звук поверхні (асфальт, табл. 4.10 дисертації) – відмінність між виміряними спектрами ефекту відсутня.

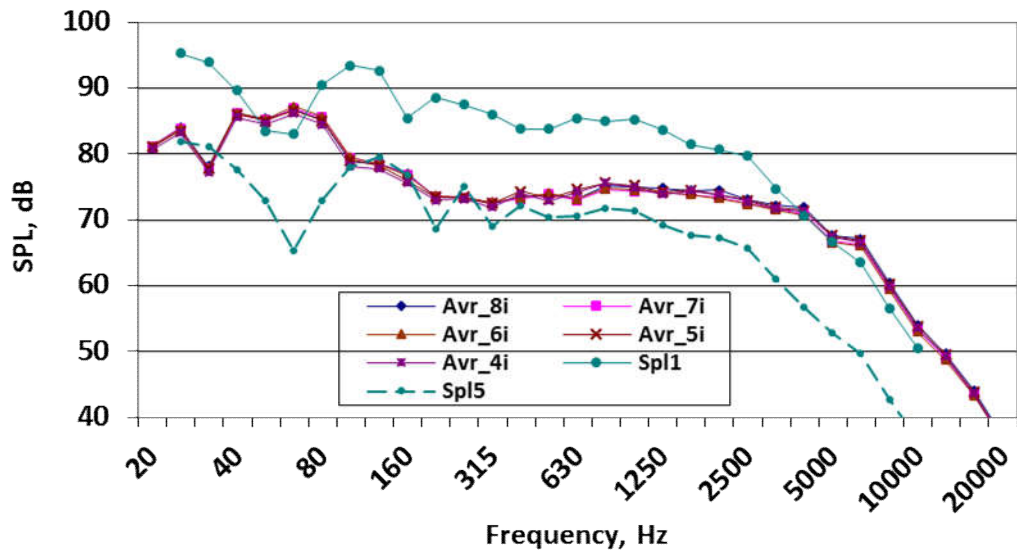


Рисунок 3.17 - Скориговані третино-октавні РЗТ шуму від шахти витоку газів ГПА-25И (точка 4' - 8' на рис. 3.4 і в табл. 3.2): штриховою лінією наведені обчислені спектральні РЗТ шуму, червоною лінією наведені усереднені виміряні спектральні РЗТ шуму

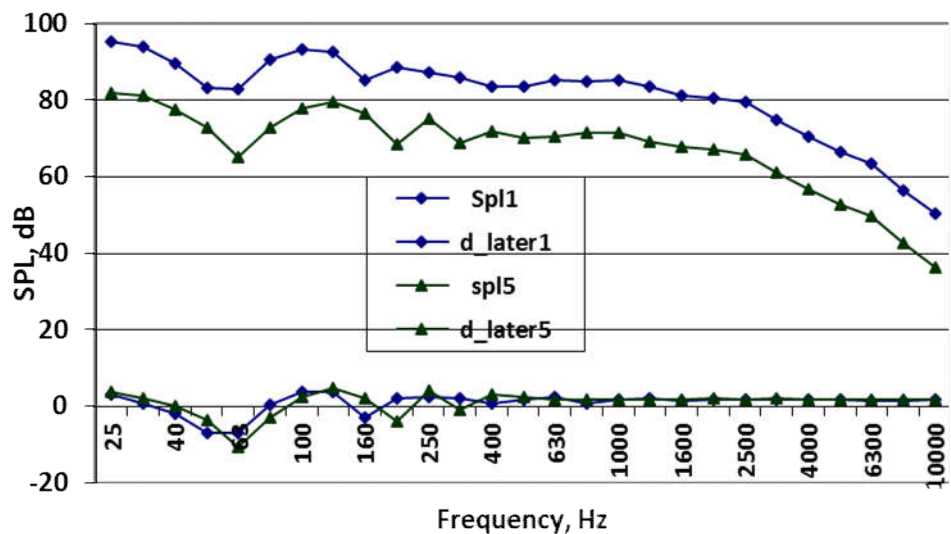


Рисунок 3.18 - Обчислені третино-октавні РЗТ шуму від шахти витоку газів ГПА-25И (точка 4' на рис. 3.4 і в табл. 3.2)

Для наведеного результату на рис. 3.17 індекс відповідності  $d_2$  для відстані 1м обчислений  $D2 = 0.73923E+00$ , а для відстані 5м обчислений  $D2 = 0.077748E+00$ , тобто обчислювальна модель є адекватною до результатів вимірювання. Середнє відхилення для даних відстаней  $MAE = 0.777500E+01$  і  $-0.632083E+01$  відповідно вказує на те, що результати обчислення і вимірювання знаходиться ближче один до

одного для відстані 3-4 м, що підтверджено обчисленнями індексу відповідності:  
 $D2 = 0.9132E+00$ .

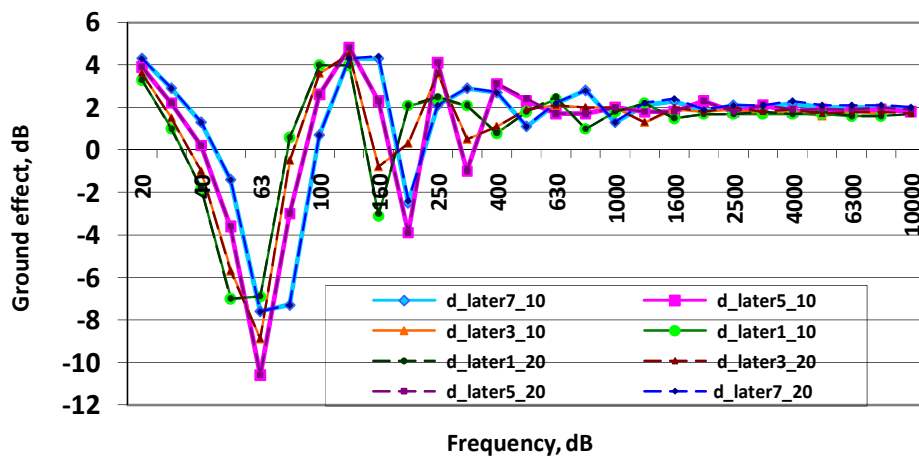
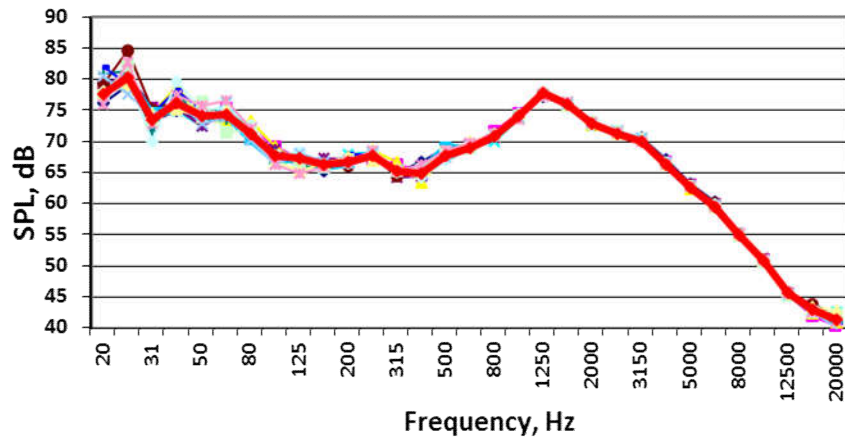


Рисунок 3.19 - Ефект впливу земної поверхні  $d\_laterX\_Y$  для оцінки РЗТ шуму від шахти витоку газів ГПА-25И (точка 4'-8' на рис. 3.4 і в табл. 3.2): X – відстань від джерела до приймача в м; Y- значення  $\sigma$  для відбиваючої звук поверхні

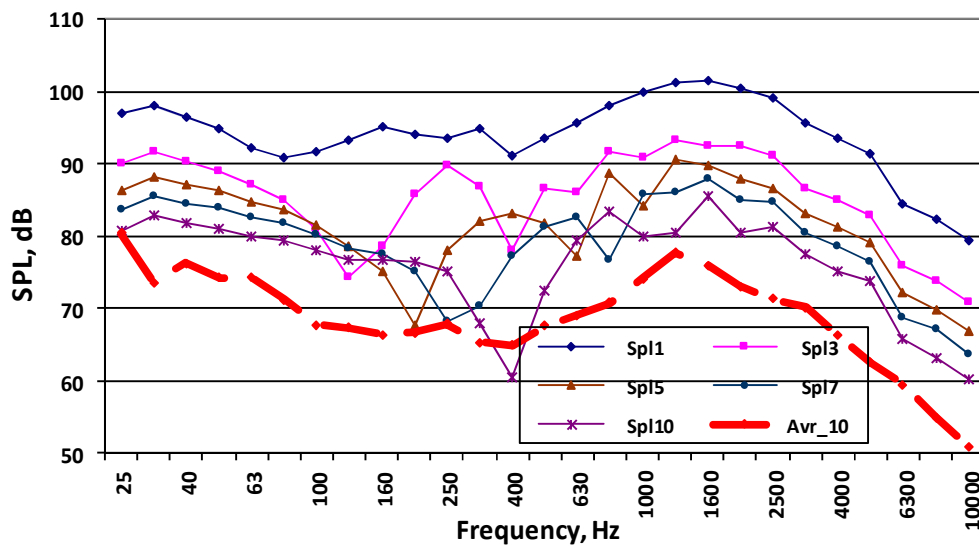
### 3.2.4. Рівні звуку від технологічної обв'язки нагнітача

Рівні звуку шуму у довкіллі від технологічної обв'язки нагнітача, утворюються, в основному, роботою центробіжного компресора нагнітача. Дане комплексне (нагнітач та газопроводи) акустичне джерело відноситься до провідних джерел шуму ГПА у цілому і його експериментальне дослідження (в натурних умовах) з метою визначення внеску у загальне акустичне поле шуму ГПА є очевидним. Вимірювання шуму від технологічної обв'язки нагнітача виконано в декількох точках: 10 – з торця укриття і технологічної обв'язки (рис. Б.18а), та біля рогу торцевої стіни укриття – 11 (рис. Б.18б).

Скориговані спектри РЗТ наведені на рис. 3.20: спектри відповідають масиву спектрів з РЗ, що дорівнює усередненому РЗ шуму протягом часу запису. На рис. 3.20б наведені обчислені спектральні РЗТ шуму від технологічної обв'язки нагнітача ГПА-25И для дистанції 1 – 10 м між мікрофоном та точкою 10. Розбіжність виміряних та обчислених результатів доволі висока, дана точка потребує уточнення в координатах та функціональному призначенні об'єкту.



а)



б)

Рисунок 3.20 - Скориговані виміряні (а) та обчислені (б) РЗТ спектри шуму технологічної обв'язки нагнітача ГПА-25И (точка 10 на рис. 3.4 і в табл. 3.2):

червоною лінією наведені усереднені виміряні спектральні РЗТ шуму;

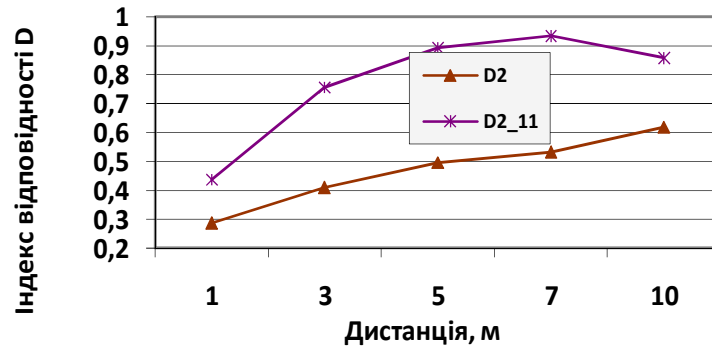
SPL<sub>i</sub>—обчислені спектри для відстаней 1...10 м від центру обв'язки

Для наведеного результату на рис. 3.20 індекс відповідності  $d_2$  для відстані 1 м обчислений  $D_2 = 0.28609E+00$ , а для відстані 10 м обчислений  $D_2 = 0.61877E+00$ , тобто обчислювальна модель в даному разі не є адекватною до результатів вимірювання. Аналіз середнього відхилення для даних відстаней  $MAE = 27$  і  $9$  дБ відповідно вказує на те, що спостерігається систематична похибка. В каталозі [5] в табл. 5 є додаткова інформація, що РЗП для шуму технологічної обв'язки нагнітача ГПА приведена до дистанції 1 м. Якщо зробити припущення, що дані табл. 5 є

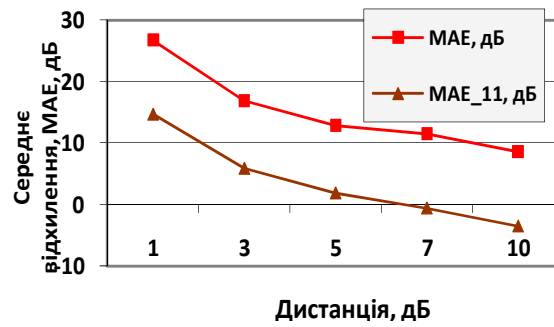
результатами не РЗП, а приведенного РЗТ до дистанції 1 м, тоді складова в моделі (4.1) оцінки шуму  $20\lg 2\pi=11$  дБ в даному випадку обчислення не враховується.

Для наведеного результату на рис. 3.20 індекс відповідності  $d_2$  для відстані 1 м обчислений  $D_2= 0.28609E+00$ , а для відстані 10 м обчислений  $D_2= 0.61877E+00$ , тобто обчислювальна модель в даному разі не є адекватною до результатів вимірювання. Аналіз середнього відхилення для даних відстаней  $MAE = 27$  і  $9$  дБ відповідно вказує на те, що спостерігається систематична похибка. В каталозі [5] в табл. 5 є додаткова інформація, що РЗП для шуму технологічної обв'язки нагнітача ГПА приведена до дистанції 1 м. Якщо зробити припущення, що дані табл. 5 є результатами не РЗП, а приведенного РЗТ до дистанції 1 м, тоді складова в моделі (4.1) оцінки шуму  $20\lg 2\pi=11$  дБ в даному випадку обчислення не враховується. На рис. 3.21 наведена залежність індексу відповідності  $d_2$  від відстані з урахуванням та без цієї складової – на відстані 7 м індекс  $d_2$  може вдвічі більший від аналогічного для результатів обчислення на рис. 3.20. Середнє відхилення для даних відстаней  $MAE$  (рис. 3.21б) також вказує, що для даного джерела найкраще РЗТ обчислюються для розрахункової відстані 7 м.

На рис. 3.22 наведено порівняння усереднених третино-октавних спектрів РЗТ шуму в точках 11 і 5 біля ГПА-25И зі спектрами акустичних джерел технологічної обв'язки нагнітача (точка 10) та шахти витоку газів (точка 4') – в смугах середніх та високих частот спектри РЗТ в точках 11 і 5 більше подібні до спектру шуму технологічної обв'язки нагнітача (точка 10), а в смугах низьких частот – до спектру шуму шахти витоку газів (точка 4'). Розбіжність вимірних та обчислених результатів (для ГПА-25И у цілому) доволі висока, дана точка потребує уточнення в координатах та функціональному призначенні об'єкту. Індеси відповідності результатів обчислення для точок 11 і 5  $D_2= 0.81156E+00$  і  $D_2= 0.82204E+00$  майже однакові, що вказує на подібність цих точок між собою за умовами розповсюдження шуму від ГПА. Індекс відповідності при порівнянні обчисленого спектру з вимірним спектром в точці 10 технологічної обв'язки нагнітача більший від порівняння з вимірним спектром в точці 4 шахти випуску газів -  $D_2= 0.58493E+00$  і  $D_2= 0.54526E+00$  відповідно.



а)



б)

Рисунок 3.21 - Залежності індексу відповідності (а) та середнього відхилення (б) обчислення РЗТ шуму технологічної обв'язки нагнітача ГПА

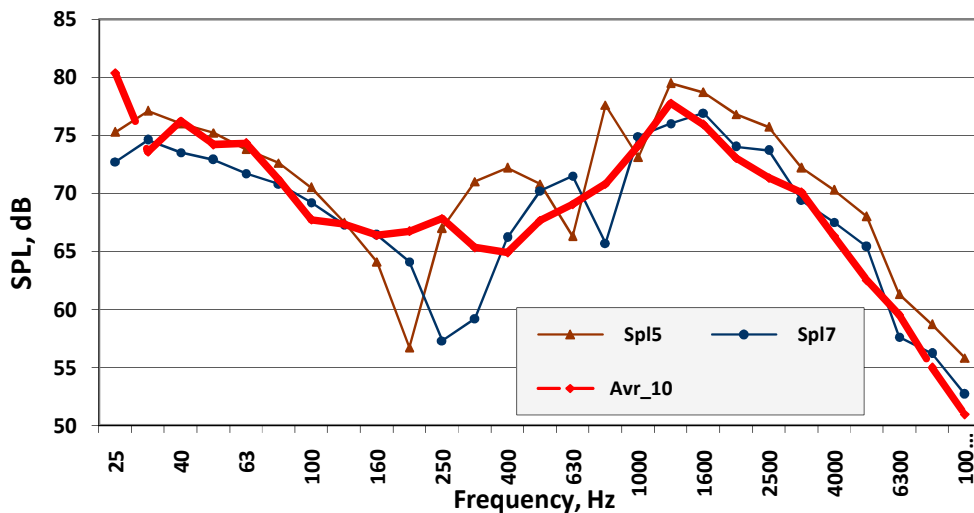


Рисунок 3.22 - Скориговані виміряні та обчислені РЗТ спектри шуму технологічної обв'язки нагнітача ГПА-25И (точка 10 на рис. 3.4 і в табл. 3.2): червоною лінією наведені усереднені виміряні спектральні РЗТ шуму; SPLi – обчислені спектри для відстаней 5 і 7 м від центру обв'язки



### 3.2.5. Рівні звуку від ГПА у цілому

Рівні звуку та РЗТ шуму у довкіллі від ГПА у цілому, які утворюються роботою усіх домінантних джерел ГПА виконані на території КС і поза нею. Його експериментальне дослідження (в натурних умовах) 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. Вимірювання шуму від ГПА у цілому виконано в декількох точках 5-11 (рис. 3.2). Вид поверхні, що відбиває звукові промені, в усіх точках був різним.

На рис. 3.23 наведено порівняння усереднених третино-октавних спектрів РЗТ шуму в точках 5, 11, 6, 7, 8 і 9 на відстані 50-480 м від шахти витоку газів ГПА-25И зі спектрами шуму акустичних джерел технологічної обв'язки нагнітача (точка 10) та шахти витоку газів (точка 4') – крім впливу ефекту поширення звуку від точкового джерела ( $-20\lg R$ ) і ефекту поглинання звуку в атмосферному повітрі ( $-\alpha R$ ) очевидним є вплив ефекту земної поверхні в смугах середніх та високих частот.

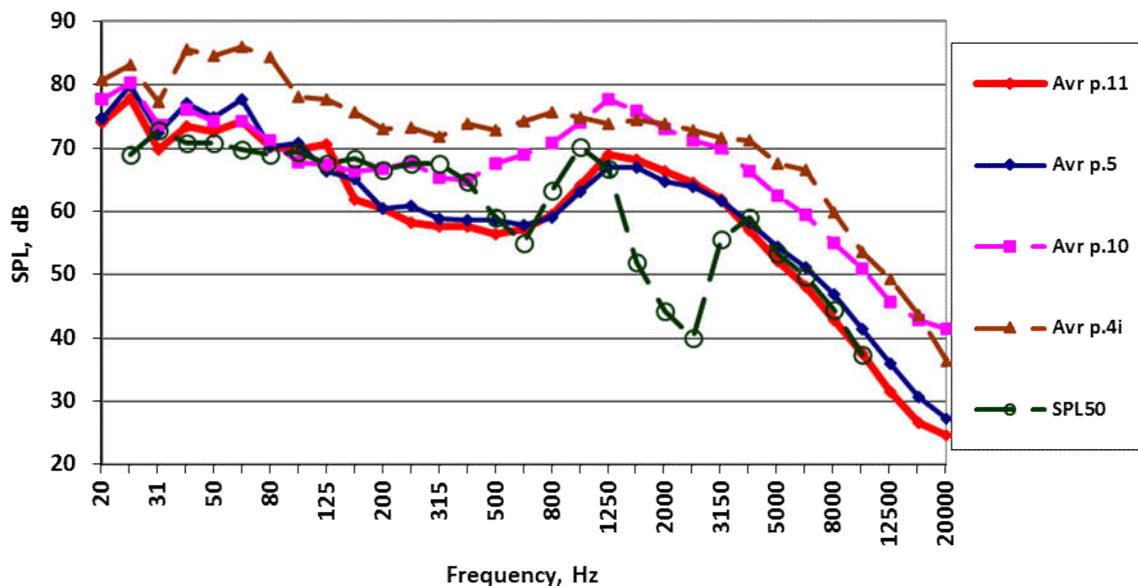


Рисунок 3.22 - Порівняння усереднених третино-октавних спектрів РЗТ шуму в точці 11 і 5 біля ГПА-25И зі спектрами акустичних джерел технологічної обв'язки нагнітача (точка 10) та шахти витоку газів (точка 4'): пунктирною лінією наведені обчислений спектр РЗТ шуму для ГПА-25И у цілому (потужність випромінювання з табл. 3.2)

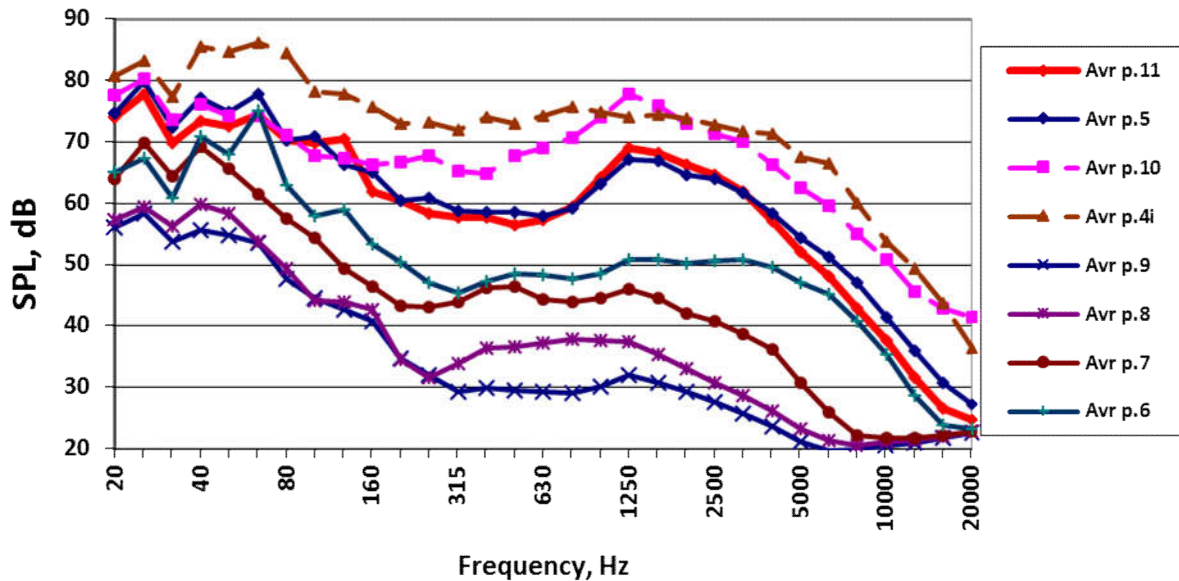


Рисунок 3.23 - Порівняння усереднених третино-октавних спектрів РЗТ шуму в точках 5, 11, 6, 7, 8 і 9 на відстані 50-480 м від шахти витоку газів ГПА-25И зі спектрами шуму акустичних джерел технологічної обв'язки нагнітача (точка 10) та (точка 4')

На рис. 3.24 наведено порівняння спектрів РЗТ ефекту впливу земної поверхні, тобто інтерференції прямого та відбитого від земної поверхні звукових променів, обчислених для умов, що спостерігалися протягом вимірювань шуму в точках 5, 11, 6, 7, 8 і 9. На відстані 50-480 м ефект впливу земної поверхні в смугах низьких частот (до 160-315 Гц в залежності від відстані) спричиняє зростання РЗТ в результаті складання енергій звуку прямого та відбитого променів. В смугах середніх (від 160 до 1250 Гц в залежності від відстані) та високих частот (наприклад в смузі 6300 Гц для відстані 480 м) ефект впливу земної поверхні спричиняє послаблення РЗТ в результаті складання енергій звуку прямого та відбитого променів.

На рис. 3.25 наведено порівняння спектрів РЗТ, виміряних та обчислених для умов, що спостерігалися протягом вимірювань шуму в точках 5, 11, 6, 7, 8 і 9. Розбіжність виміряних та обчислених результатів (рівні звукової потужності використані для ГПА-25И у цілому з табл. 3.1) доволі висока, рівні звукової потужності для ГПА-25И у цілому потребують уточнення.

Вплив ефекту земної поверхні також виражений у залежності рівнів звуку від відстані (рис. 3.26) – 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 у порівнянні із рівнями звуку, виміряними на території (асфальто-бетонне покриття відбиваючої поверхні). Також є відмінною інтенсивність зниження РЗ з відстанню на ділянках в межах території КС та поза нею.

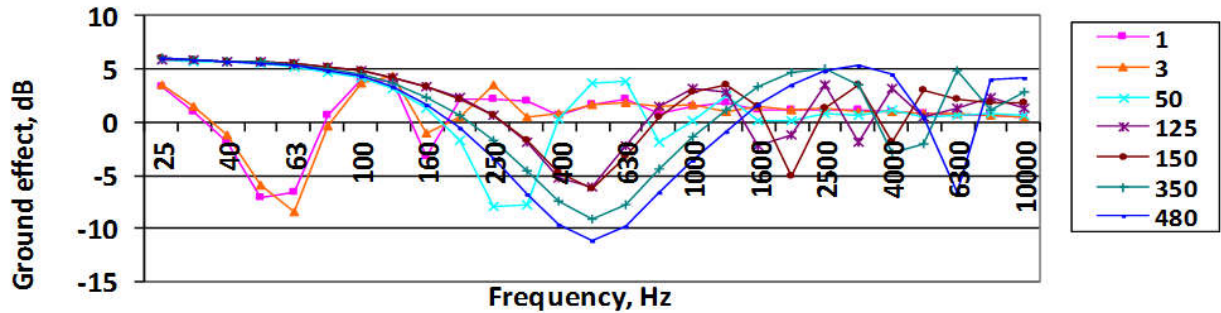


Рисунок 3.24 - Ефект впливу земної поверхні для оцінки РЗТ шуму на відстані 50-480 м від шахти витоку газів ГПА-25И (точки 5, 11, 6, 7, 8 і 9 наведені на рис. 3.4 і в табл. 3.2)

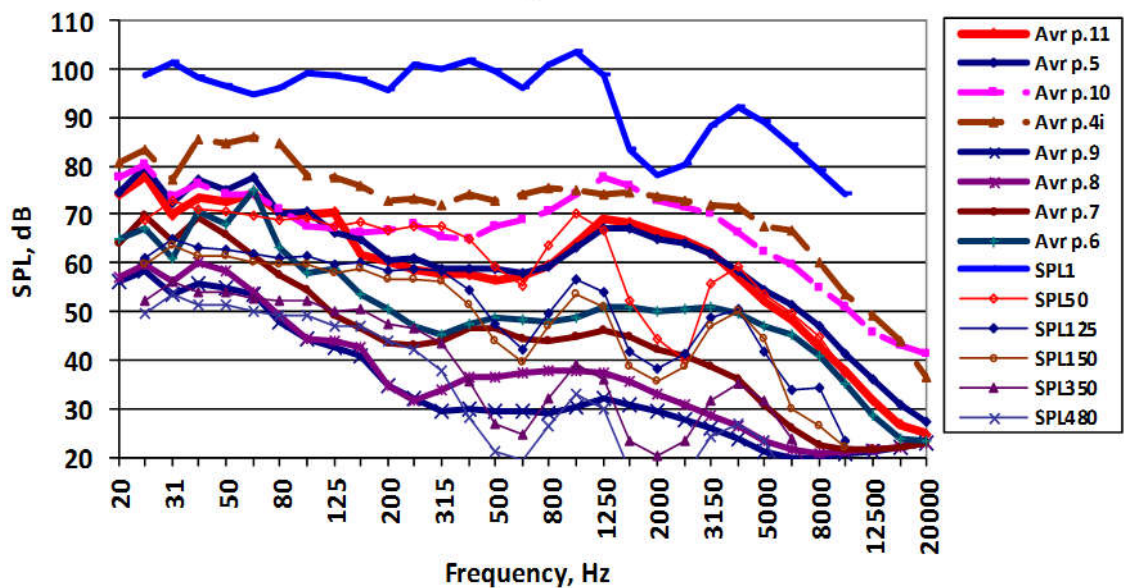


Рисунок 3.25 - Порівняння усереднених вимірених третино-октавних спектрів РЗТ шуму в точках 5, 11, 6, 7, 8 і 9 на відстані 50-480 м від шахти витоку газів ГПА-25И з обчисленими спектрами для рівнів звукової потужності для ГПА-25И у цілому з табл. 3.1

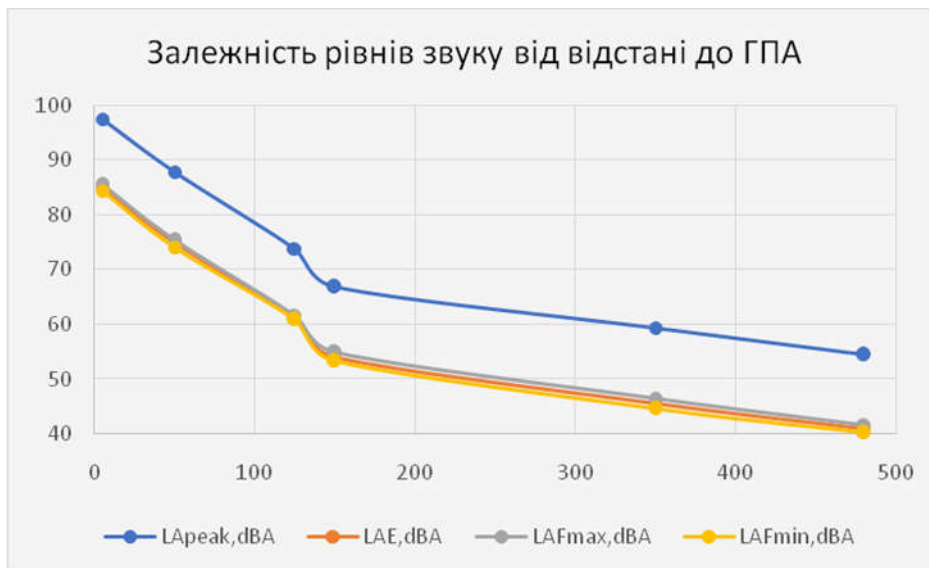


Рисунок 3.26 - Залежність виміряних рівнів звуку від відстані до шахти витоку газів для шуму ГПА-25И

### Висновки по Розділу 3

1. Проведені експериментальні дослідження вимірювання рівнів звуку та звукового тиску для шуму КС в натурних умовах на базі станції в м. Золотоноша (рис. 3.1), що складається з трьох ГПА типу ГТН-25И. Під час акустичних вимірювань на КС в роботі знаходився тільки один ГПА, тому була використана дана можливість виконати вимірювання з виділенням окремих основних джерел шуму ГПА: шахти випуску газів, що відпрацювали, шахти всмоктування повітря в ГТУ, технологічної обв'язки ГПА. Окремо виконані заміри РЗ та РЗТ всередині та збоку від будівлі ГПА.

2. Рівні звукової потужності випромінювання шуму від основних акустичних джерел ГПА ГТН-25И є дослідженими і вони наведені в каталозі [107]. Обчислені індекси відповідності для провідних джерел величиною 0,75-0,93 вказують на високу достовірність вимірювань та даних, що наведені в каталозі [107]. Особливої уваги потребує експериментальна та розрахункова оцінка шуму технологічної обв'язки ГПА – кінцеві розміри даного акустичного джерела не дозволяють моделювати його як точкове при оцінці РЗ шуму в межах території КС.

3. Експериментальне дослідження рівнів звуку та РЗТ шуму у довкіллі від ГПА у цілому 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. Вимірювання шуму від ГПА у цілому виконано в декількох точках на відстанях 50-480 м від ГПА. Вид поверхні, що відбиває звукові промені, в усіх точках був різним. Результати аналізу РЗ та РЗТ в точках контролю звуку за межами території КС (понад 125 м від джерела шуму) показують, що послаблення РЗ з відстанню відбувається з певним «зсувом» на 2-3 дБА у порівнянні із рівнями звуку, виміряними на території (асфальто-бетонне покриття відбиваючої поверхні). Також є відмінною інтенсивність зниження РЗ з відстанню на ділянках в межах території КС та поза нею. Ефект земної поверхні є істотним для визначення РЗ особливо на великих відстанях від джерела, що має бути враховано в моделі обчислення РЗ та РЗТ шуму ГПА та компресорної станції у цілому.

#### 4. ОБҐРУНТУВАННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ МОДЕЛІ РІВНІВ ЗВУКУ ДЛЯ ШУМУ КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ

Для розрахунків рівнів звуку в окремій точці в залежності від відстані до джерела шуму обчислювальна модель повинна враховувати ефекти розповсюдження звукових хвиль в атмосферному повітрі та характеристики джерела шуму [120]:

- характеристики джерела шуму, включаючи направленість і спектральні характеристики випромінювання, висоту встановлення джерела над поверхнею;
- відстань від джерела до точки визначення рівня звуку;
- поглинання звуку в атмосферному повітрі, що залежить від частоти та параметрів стану атмосфери;
- ефекту впливу землі (а саме, відбивання і поглинання звукової енергії поверхнею землі, що залежать від частоти 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).
- форми підстеляючої поверхні, що може як посилювати, так і знижувати інтенсивність звукових хвиль.

Цим умовам відповідає модель та програмне забезпечення *NoBel*, які розробляються в Національному авіаційному університеті. Рівні звукового тиску  $L_p(f)$  в точці контролю шуму на відстані  $R$  в залежності від частоти  $f$  випромінювання у загальному випадку розраховуються за формулою:

$$L_p(f) = L_w(f) - 10 \lg(4\pi R^2) - \alpha R - \Delta L_{gr} - \Delta L_{scr} - \Delta L_{ref} - \Delta L_{tl} \quad , \quad (4.1)$$

де  $L_w(f)$  – рівні звукової потужності джерела шуму (вданому випадку, наприклад, – ГТУ, табл. 3.1),  $\alpha$  – коефіцієнт поглинання звуку в повітрі,  $\Delta L_{gr}$  – ефект впливу землі,  $\Delta L_{scr}$  – ефект екранування звукових хвиль,  $\Delta L_{ref}$  – ефект рефракції звукових хвиль,  $\Delta L_{tl}$  – ефект звукоізоляції огорожувальної будівлі (розглядається за умови розміщення джерела шуму всередині будівлі – наприклад ГТУ розміщуються в машинному залі КС).

Вплив вітру та температури атмосферного повітря на розповсюдження звукових хвиль відбувається через так званий ефект рефракції звуку в результаті зміни швидкості вітру та температури з висотою над поверхнею землі, що характеризуються значеннями їх градієнтів (див. розділ 4.2.3).

Базовий сценарій обчислення рівнів звуку для шуму КС побудований для КС «Яготин» [73], проект реконструкції якої передбачає переоснащення на нові більш ефективні ГПА (розд. 1.4). За даними звіту рівень звуку за умови одночасної роботи двох компресорних цехів при максимальному рівні звукового тиску на території компресорної станції не перевищує нормативів ДБН В.1.1-31:2013 [112] для території житлових приміщень в нічній період (45 дБА).

## 4.2. Алгоритм розрахунку очікуваних рівнів звукового тиску від КС

### 4.2.1. Алгоритм ДСТУ-Н Б В.1.1-33:2013

Відповідно до вимог чинної державної настанови [116] РЗ  $L_{\text{Атер}}$  у дБА в розрахункових точках на території житлової забудови вимірюються згідно з ГОСТ 23337 [127] або визначаються розрахунком і подальшим енергетичним підсумовуванням (згідно з формулою (12) настанови [116]) відповідних РЗ  $L_{\text{Атер } i}$ , дБА, від окремих джерел шуму, що формують звукове поле.

Рівні звуку в розрахункових точках від окремих джерел шуму визначають згідно з 7.5 настанови [116], а саме: «У розрахункових точках необхідно визначати еквівалентні рівні звуку  $L_{\text{Аекв тер}}$ , дБА. Для об'єктів, у яких норми шуму встановлено окремо для денного та нічного часу доби, треба визначати ці величини як для дня, так і для ночі:

$$L_{\text{Ар}} = L_{\text{АВ}} - \Delta L_{\text{Ар}} - \Delta L_{\text{Аβ}} - \Delta L_{\text{Аsurf}} - \Delta L_{\text{Аscr}} - \Delta L_{\text{Аgrbelt}} - \Delta L_{\text{Аlim\_angle}} - \Delta L_{\text{Аrefl}} \quad (4.2)$$

де  $L_{\text{АВ}}$  - відповідна шумова характеристика джерела шуму у дБА, визначена згідно з розділом 6 (при розрахунку еквівалентного рівня звуку  $L_{\text{А}} = L_{\text{Аекв}}$ , при розрахунку максимального рівня звуку  $L_{\text{А}} = L_{\text{А макс}}$ ) настанови [116];  $\Delta L_{\text{Ар}}$  - поправка у дБА, що враховує зниження РЗ в залежності від відстані  $r$ , м, між джерелом шуму і розрахунковою точкою, визначається згідно з 7.7 настанови [116];  $\Delta L_{\text{Аβ}}$  - поправка у



дБА, що враховує зниження РЗ внаслідок затухання звуку в повітрі, визначається згідно з 7.8;  $\Delta L_{Asurf}$  - поправка у дБА, що враховує вплив на РЗ в розрахунковій точці типу покриття території, визначається згідно з 7.9;  $\Delta L_{Ascr}$  - поправка у дБА, що враховує зниження РЗ екранами на шляху поширення шуму; визначається згідно з розділом 9;  $\Delta L_{Agrbelt}$  - поправка у дБА, що враховує зниження РЗ смугами зелених насаджень, визначається згідно з розділом 10;  $\Delta L_{Alim\_angle}$  - поправка у дБА, що враховує зниження РЗ видимості джерела шуму з розрахункової точки; визначається згідно з 7.10;  $\Delta L_{Arefl}$  - поправка у дБА, що враховує підвищення РЗ в розрахунковій точці внаслідок накладання звуку, відбитого від огорожувальних конструкцій будівель, визначається згідно з 7.11.

Зокрема поправка  $\Delta L_{A\beta}$ , дБА, визначають доволі спрощено в залежності від відстані  $r$  за формулою:

$$\Delta L_{A\beta} = 5r/1000. \quad (4.3)$$

Величину поправки  $\Delta L_{Asurf}$ , дБА, визначають наступним чином:

а) за відсутності екранів на шляху поширення шуму та м'яким покриттям території (пухкий ґрунт, трава, дрібний чагарник, тощо) за формулами:

$$\Delta L_{Asurf} = \Delta L_{A\text{ пок}} = 6 \lg \frac{\sigma^2}{1 + 0,01\sigma^2}; \sigma = \frac{0,14l \cdot 10^{-0,3h_d}}{h_p}, \quad (4.4)$$

де  $l$  - довжина проекції відстані  $r$  на площину, яка відбиває звук, м;  $h_{дж}$  - відмітка умовного акустичного центра джерела шуму над поверхнею, яка відбиває звукову хвилю, м;  $h_p$  - відмітка розрахункової точки (точки над площиною, яка відбиває звукову хвилю), м. Величини  $l$ ,  $h_{дж}$  та  $h_p$  визначають згідно з обчислювальними схемами на рис. 4.1.

б) за відсутності екранів на шляху поширення звукових хвиль і акустично твердим покриттям (щільний ґрунт, асфальт, бетон, вода)  $\Delta L_{Asurf} = 0$ ;

в) за наявності екранів між джерелом шуму та розрахунковою точкою величину  $\Delta L_{Ascr}$  визначають згідно з 9.6 [116].



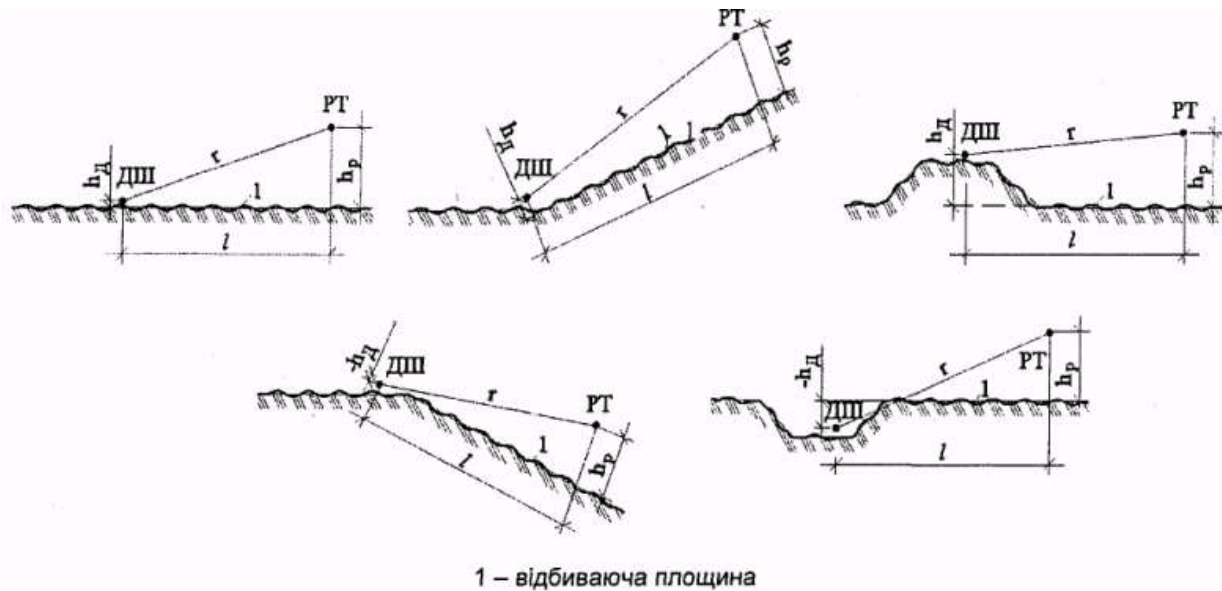


Рисунок 4.1 - Геометричні характеристики розташування джерела шуму (Дж) і розрахункової точки (Р) за наявності екранів на шляху поширення звуку [116]

Принципово формула (4.2) з настанови [116] застосовується до всіх джерел шуму довкілля, але дана настанова не вміщує спеціальних розділів з вимогами та початковими даними для обчислення зокрема джерел шуму КС.

#### 4.2.2. Алгоритм СТО ГАЗПРОМ

Акустичний розрахунок проводиться відповідно до СТО ГАЗПРОМ 2-3.5-042-2005 [128] в дев'яти октавних смугах. Октавні рівні звукового тиску  $L$  (дБ) в розрахункових точках слід визначати за формулою:

$$L = L_p + 10 \cdot \lg \Phi - 10 \cdot \lg \Omega - 20 \cdot \lg r - \beta_\alpha \cdot r / 1000 + \Delta L_{omp} - \Delta L_c, \quad (4.5)$$

де  $L_p$  - октавний або октавний НРГ джерела шуму, дБ;

$\Phi$  - чинник спрямованості джерела шуму для напрямлення на розрахункову точку, безрозмірний; для ненаправленого джерела шуму  $\Phi = 1$ ; при оцінці шуму, створюваного джерелом з невідомим чинником спрямованості  $\Phi$ , його слід вважати ненаправленим;  $\Omega$  - просторовий кут (в стерadiansах), в який випромінюється шум, для джерела шуму в простір  $\Omega = 4\pi$  ( $10 \cdot \lg \Omega = 11.0$ ); на поверхні території або огорожувальних конструкцій будівель і споруд  $\Omega = 2\pi$ .

Джерело шуму, що знаходиться над поверхнею території або на конструкціях будівель і споруд (рис. 4.2), слід вважати розташованим в просторі при виконанні умови,  $H_{шум} > 0,5 r_1$ ,

де  $H_{шум}$  - висота джерела шуму над поверхнею території;  $r_1$  - відстань від джерела шуму до розрахункової точки.

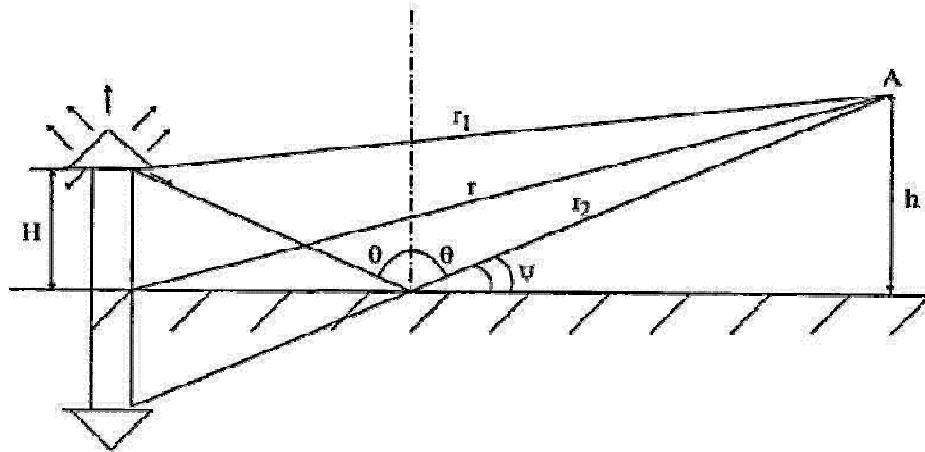


Рисунок 4.2 - Схема поширення звуку над землею поверхнею:  $r_1$ - прямий промінь;  $r_2$ - відбитий промінь від поверхні

Коефіцієнт поглинання звуку в повітрі  $\beta_{\alpha}$ , дБ/км, приймається за табл. 2.1 [128], при  $r \leq 50$  м поглинанням звуку в повітрі нехтується. Додаткове зниження РЗ або РЗТ  $\Delta L_c$  елементами навколишнього середовища:

$$\Delta L_c = \Delta L_{\text{екр}} + \Delta L_{\text{нов}} + \beta_{\text{зел}} \cdot l + \Delta L_{\text{ног}},$$

де  $\Delta L_{\text{екр}}$  - зниження РЗТ екранами, розташованими між джерелом шуму і розрахунковою точкою;  $\Delta L_{\text{нов}}$  - зниження РЗТ поверхнею землі;  $\beta_{\text{зел}}$  - коефіцієнт ослаблення звуку смугою лісонасаджень, дБ/м,  $l$  - ширина лісосмуги, м;  $\Delta L_{\text{ног}}$  - зниження РЗТ, обумовлене погодними умовами.

Для орієнтовних розрахунків зниження рівня звуку над поверхнею, що поросла травою або покрита снігом  $\Delta L_{\text{нов}}$ , дБА, допускається визначати за формулою:

$$\Delta L_{\text{Анов}} = (9,21 \cdot \lg r - 17) + 0,4 \left( 20 - 12 \cdot \lg(h_p \cdot H_{\text{дж}}) \cdot (0,6 \lg r - 0,7) \right). \quad (4.6)$$

З наближенням джерела шуму до земної поверхні (відбиття звуку) пряма та відбиті хвилі синфазно складаються і РЗТ додатково зростає на величину  $\Delta L_{нов} = 3$  дБ [128], при виконанні умов:

$$h_p \ll r, H_{дж} \ll r; f \leq \frac{40 \cdot r}{H \cdot h} \quad (4.7)$$

де  $h_p$  - висота приймача звуку, м;  $r$  - відстань від джерела до точки спостереження, м;  $H_{дж}$  - висота джерела, м;  $f$  – середньо-геометрична частота октавних смуг, Гц.

Фізично наявність зони загасання пояснюється тим, що при відбиванні звукової хвилі від поверхні змінюється не тільки амплітуда (через поглинання), але й фаза, причому зміна фази, що відбувається при ковзному відбиванні  $\psi \rightarrow 0$  (рис. 4.2), наближується до  $180^\circ$ . Тому при малих кутах ковзання  $\psi$  пряма і відбита хвилі в результаті інтерференції гасять одна одну [129]. Відбувається інтерференційний перерозподіл звукової енергії, і над поверхнею землі встановлюється зона мінімальних рівнів ( $\Delta L_{нов} > 0$ ), а над нею – зона максимуму  $\Delta L_{волн} > 0$ .

Для розрахунку додаткового загасання  $\Delta L_{нов}$ , дБ, над землею з трав'яним (сніжним) покривом визначають нижню і верхню межі інтервалу частот, в якому воно можливо, за формулами (за умови  $h_p > 1$  м,  $H_{дж} > 1$  м):

$$f_H = 2 \cdot 10^3 / \sqrt{r}; f_s = 20 \cdot r / H_{дж} \cdot h_p \quad (4.8)$$

Для частот, що належать до цього інтервалу, розрахунок додаткового загасання  $\Delta L_{нов}$  виконується за формулою:

$$\Delta L_{нов.} = 20 \lg r - 10 \lg \left[ \frac{2 \cdot 10^{13}}{f^4} + 10^{-3} f^2 (h \cdot H)^2 \right] \quad (4.9)$$

Точність такого розрахунку не завжди є достатньо високою внаслідок змін акустичних властивостей трав'яного або снігового покриву в області частот  $f < 200$  Гц і впливу вітру і турбулентності в області  $f > 200$  Гц. Над твердою поверхнею вважають  $\Delta L_{нов} = 0$ , якщо відбитий промінь потрапляє в точку спостереження, і  $\Delta L_{нов} = 3$  дБ за умови що він не потрапляє в точку спостереження [129]. Вираз (4.9) дає досить гарне узгодження з експериментальними даними [130] врахування впливу поверхні землі на розсіювання звуку. Зазвичай його і використовують при розрахунках.

#### 4.2.3. Розрахунок для схеми компресорного цеху №2 КС «Яготин»

Відповідно до табл. 4.1 з Каталогу [31] рівні звукової потужності в октавних смугах частот та коригований за шкалою «А» рівень звукової потужності для різних типів ГПА знаходимо відповідні характеристики для ГТ-750-6:

Таблиця 4.1 - Характеристика шуму ГПА

Тип агрегату	Рівні звукової потужності (дБ) в октавних смугах частот (Гц)									Коригований рівень звукової потужності, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
ГПА-Ц-6,3	131	133	134	130	130	134	131	129	126	138
ГПА-Ц-16	126	125	125	120	118	115	116	115	111	123
ГТ-6-750	125	121	115	118	117	125	118	132	118	131
ГТ-750-6	123	121	129	127	117	113	116	124	107	126
10 ГКНА	105	104	100	110	112	115	103	107	99	120
ГПА-Ц-16С	108	109	105	102	100	101	102	98	92	107

Для вимірюючого значення рівня звуку  $L_{Ap1}$  в точці  $r_1$  значення рівня звуку перераховується на відстань  $r_2$  відповідно з формулою (18) з ДСТУ [116]:

$$L_{Ap2} = L_{Ap1} - 20 \lg(r_2/r_1) - 5(r_2 - r_1)/1000 - \Delta L_{A \text{ surf} 12} + \Delta L_{A \text{ surf} 11}.$$

Відповідно до звіту [122] (максимальний можливий рівень максимального тиску а території компресорної станції від усіх джерел за умови роботи одного ГПА)  $L_{Ap1} = 92$  дБА, дистанція до межі КС від цеху №2А беремо на рис. 1.2  $r_1 = 50$  м, якщо працюючий ГПА в центрі цеху №2 тоді  $r_1 = 150$  м. Висота розміщення джерела шуму ГПА КТ-750-6 приведена до координати вихідного отвору башти відведення газів, що відпрацювали в ГТУ (10 м над поверхнею землі). Результати обчислення РЗ в залежності від відстані до джерела шуму зведені на рис. 4.3, де  $L_{A \text{ ГазПром}}$  - обчислений РЗ за методикою ГазПром,  $L_{A \text{ ДСТУ}}$  - обчислений РЗ за методикою ДСТУ для рівнів звукової потужності ГПА ГТ-750-6,  $L_{A \text{ ДСТУ } r_1 = 50 \text{ м}}$  - обчислений РЗ за методикою ДСТУ методом перерахунку від вимірюючого значення РЗ на відстані 50 м,  $L_{A \text{ ДСТУ } r_1 = 150 \text{ м}}$  - обчислений РЗ за методикою ДСТУ методом перерахунку від вимірюючого значення РЗ на відстані 150 м.

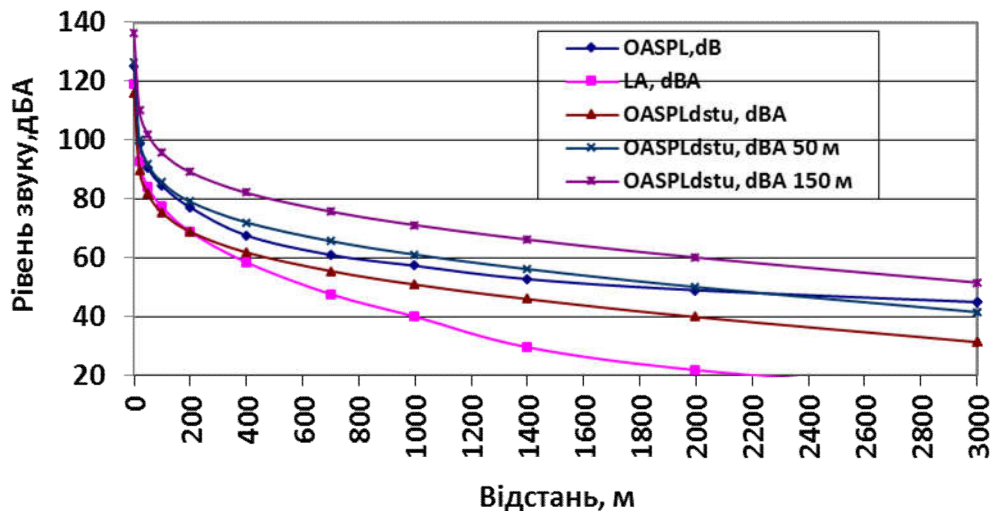


Рисунок 4.3 - Обчислені РЗ за різними методиками для шуму ГПА ГТ-750-6 (за даними табл. 4.1)

Навіть для умови роботи одного ГПА РЗ на відстані 700 м від джерела шуму перевищує значення нормативу у нічний період доби (45 дБА). На відстані 700 м від межі КС (750 м від джерела шуму) максимальний рівень звуку обчислюється величиною  $L_{\text{АмаксДСТУ}}=65$  дБА. Тобто значно вище значення ніж отримано у звіті [122] і на 20 дБА вище нормативного значення у нічний період доби.

Для порівняння на рис. 4.4 також наведені значення за більш сучасною методикою ГазПрому [128], яка також за основу обчислення «використовує» октавні рівні звукової потужності ГПА з табл. 4.1 (табл. 11 в каталозі [31]).

За даними каталогу [31] основними джерелами шуму ГПА ГТ-750-6 є наступні (з табл. 2, 3, 4, 5 каталогу відповідно для вихлопу, всмоктування, нагнітача і технологічна обв'язка нагнітача), табл. 4.2. З табл. 4.2 легко бачити, що для частотних смуг октавного спектру 31,5...1000 Гц доміантним джерелом шуму є шахта витоків або вихлопу газів, в смугах середніх частот 500-1000 Гц – нагнітач, а у високочастотних смугах понад 2000 Гц – шахта всмоктування ГТУ ГПА. За умови приведення висоти узагальненого джерела шуму ГПА у цілому до висоти шахти всмоктування повітря (3 м) тоді отримаємо залежності РЗ від відстані до точки контролю шуму, наведені в табл. 4.3.

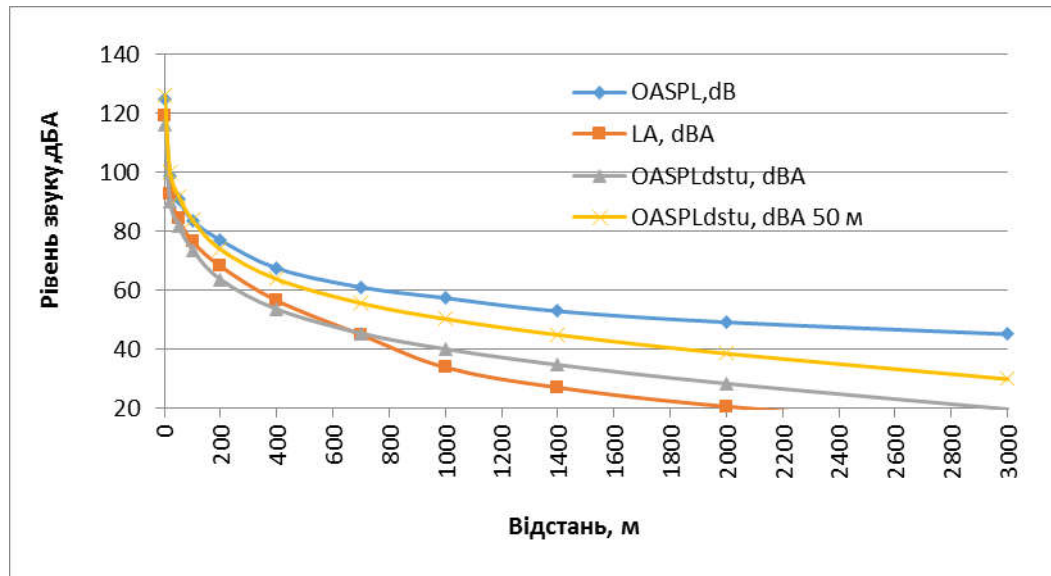


Рисунок 4.4 - Обчислені РЗ за різними методиками для шуму ГПА ГТ-750-6

Можна побачити у порівнянні результатів РЗ на рис. 4.3 та 4.4, що за спрощеними моделями обчислення РЗ за ДСТУ [116] вплив висоти джерела шуму не спостерігається, а за методикою ГазПрому [128] наявні суттєві відмінності величиною 2-3 дБА обчислені для коригованих за шкалою «А» РЗ (для сумарних рівнів звукового тиску OASPL в межах 1 дБ) саме для відстаней, які порівнюються з радіусами зони безпеки від КС різного класу (300-700 м), табл. 4.3. Тому дослідження впливу топографічних та метеорологічних (сезонних) умов на рівні звуку від КС на межі зони безпеки (санітарно-захисної зони – СЗЗ) представляє теоретичний та практичний інтерес.

#### 4.2.4. Обчислення рівнів звуку для шуму КС з урахуванням стану атмосфери

##### 4.2.4.1. Модель обчислення рівнів звуку CONCAWE

Модель CONCAWE була створена для прогнозування РЗТ в октавних частотних смугах від 63 Гц до 4 кГц та еквівалентних рівнів звуку від нафтопереробних та нафтохімічних виробничих комплексів [132]. Модель можна застосовувати на відстанях до 2 км та для висот джерел шуму до 25 м. Модель передбачає сферичне поширення звукових хвиль від точкових акустичних джерел також як [4,8].

Послаблення РЗТ з відстанню за рахунок атмосферного поглинання розраховується згідно з методами ANSI S1.26 [133].

Таблиця 4.2 - Октавні рівні звукової потужності основних джерел шуму ГПА ГТ-750-6

Тип агрегату	Висота джерела шуму, м	Рівні звукової потужності, дБ, в октавних смугах частот, Гц									Коригований РЗП, дБА
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Шахта витоку газів	10	123	121	129	127	117	113	110	101	107	118
Шахта всмоктування повітря	3	108	106	104	106	108	98	114	124	107	128
Нагнітач	2,5	97	94	103	108	113	116	111	105	98	121
Технологічна обв'язка нагнітача	1,8	103	102	97	109	110	112	107	98	84	117
ГТ-750-6 у цілому (табл. 11 [31])		123	121	129	127	117	113	116	124	107	126

РЗТ обчислюється за формулою [16]:

$$L_p = L_w + D - K_1 - K_2 - K_3 - K_4 - K_5 - K_6 - K_7, \quad (4.10)$$

де  $L_w$  – РЗП джерела шуму в октавних смугах частот,  $D$  – показник спрямованості випромінювання джерела шуму, що досліджується,  $K_1$  – ослаблення звуку через геометричне розповсюдження звукових хвиль,  $K_2$  – ослаблення звуку через поглинання звукової енергії атмосферним повітрям,  $K_3$  – ослаблення звуку через ефект впливу земної поверхні,  $K_4$  – корекція РЗТ на висоту джерела та приймача шуму,  $K_5$  – ослаблення звуку через метеорологічні ефекти,  $K_6, K_7$  – ослаблення звуку через наявність акустичних екранів і екранування обладнанням, що щільно розташоване на території підприємства навколо джерела шуму. В принципі всі компоненти такі ж, як у моделі [128], за винятком компонента  $K_5$ , що враховує метеорологічних ефектів на розповсюдження шуму від джерела в точку контролю.

Таблиця 4.3 - Обчислені РЗ за методикою ГазПрому для шуму ГПА ГТ-750-6 (висота джерела 3 та 10 м)

Відстань, м	OASPL, дБ H <sub>дж</sub> =3м	OASPL, дБ H <sub>дж</sub> =10м	L <sub>A</sub> ГазПром, дБА H <sub>дж</sub> =3м	L <sub>A</sub> ГазПром, дБА H <sub>дж</sub> =10м
1	124,978	124,978	119,020	119,020
20	98,886	98,886	92,676	92,676
50	90,825	90,825	84,226	84,226
100	83,647	84,660	76,528	77,438
200	76,964	77,310	68,099	69,041
400	67,425	67,744	56,448	58,613
700	60,970	61,110	44,835	47,776
1000	57,334	57,415	33,778	40,173
1400	52,874	52,904	26,937	29,767
2000	49,109	49,122	20,528	21,999
3000	45,049	45,055	13,510	14,361

Значення ефекту впливу земної поверхні  $K_3$  можна отримати, лише відстанню, пройдену звуковою хвилею над акустично "м'яким" ґрунтовим покриттям, і отримавши відповідне значення з рис. 4.5а [132]. Для акустично твердих ґрунтових поверхонь, таких як бетон або вода,  $K_3 = -3$  дБ для всіх частотних смуг і відстаней. Корекція РЗТ на висоту джерела та приймача шуму  $K_4$  наведена на рис. 4.5б. Модель CONCAWE враховує не тільки суттєві топографічні особливості, але також метеорологічні умови, що склалися на місці (рис. 4.5в).

Модель CONCAWE класифікує метеорологічні ефекти за шістьма категоріями (рис. 4.5в) на основі комбінованого вертикального градієнта швидкості звуку в атмосферному повітрі на земною поверхнею. Градієнт температури атмосферного повітря визначається категоріями стабільності Пасквіла від А до Г. Категорія А являє собою стан швидкого спаду градієнта (тобто велике зниження температури з висотою), а категорія Г визначає умови температурної інверсії, яку можна виявити у спокійну зоряну ніч. Ослаблення  $K_5$  є функцією частоти, відстані та метеорологічної категорії Пасквіла. Модель враховує вертикальний градієнт швидкості вітру опосередковано, таким чином, ефект згинання вгору звукових променів в умовах



вітру не розраховується. Що стосується захисного екранування та ослаблення екранування, методи, що використовуються в моделі CONCAWE, є відповідно реалізацією відомого методу Маєкави [134].

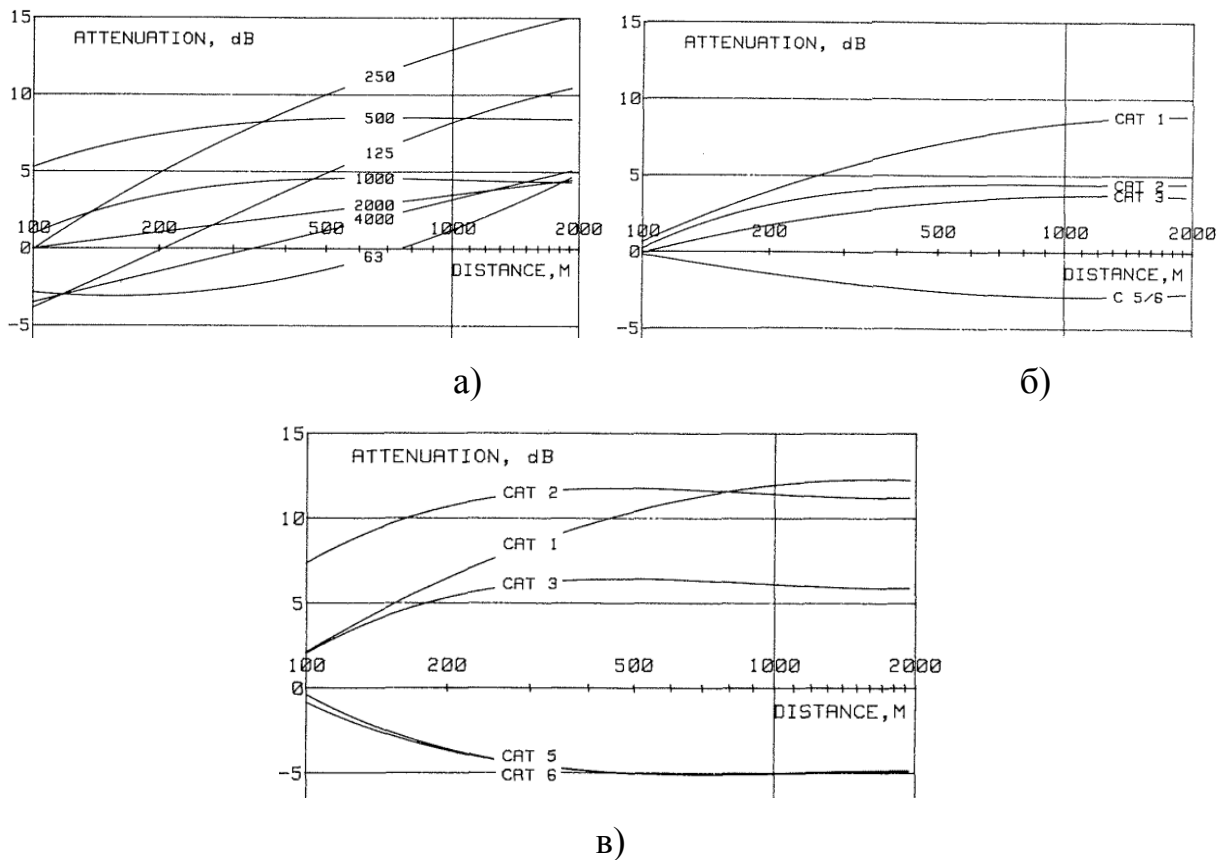


Рисунок 4.5 - Поправки на умови розповсюдження звуку від джерела за моделлю CONCAWE: а) ефект впливу земної поверхні  $K_3$  на ослаблення звуку; б) корекція  $K_4$  на висоту джерела та приймача шуму (незалежно від частоти); в) корекція  $K_5$  на метеорологічні ефекти на поширення звукових хвиль

Модель CONCAWE дозволяє прогнозувати РЗТ та рівні звуку за шкалою «А» від нафтопереробних та нафтохімічних комплексів на великі відстані, в умовах різноманітної місцевості та для різних метеорологічних умов, для яких жодна сучасна відома інженерна модель не спроможна обчислювати [129,135].

Порівняння результатів обчислення за моделями ДСТУ [116], Газпрому [128] та CONCAWE [132] для базової схеми обчислення РЗТ та РЗ в залежності від відстані (для висоти  $H_{дж}=10$ м) наведені на рис. 4.6. Алгоритми (модель) обчислення РЗ за державним стандартом ДСТУ [124] 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. 4.7. Порівняння моделей Газпрому (для оцінки ефекту впливу відбиваючої поверхні по суті це модель з довідника Г. Юдіна [129]) 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, рис. 4.7), а модель CONCAWE все ще передбачає вплив інтерференції звукових хвиль – прямої та відбитої від поверхні (РЗТ < 3 дБ).

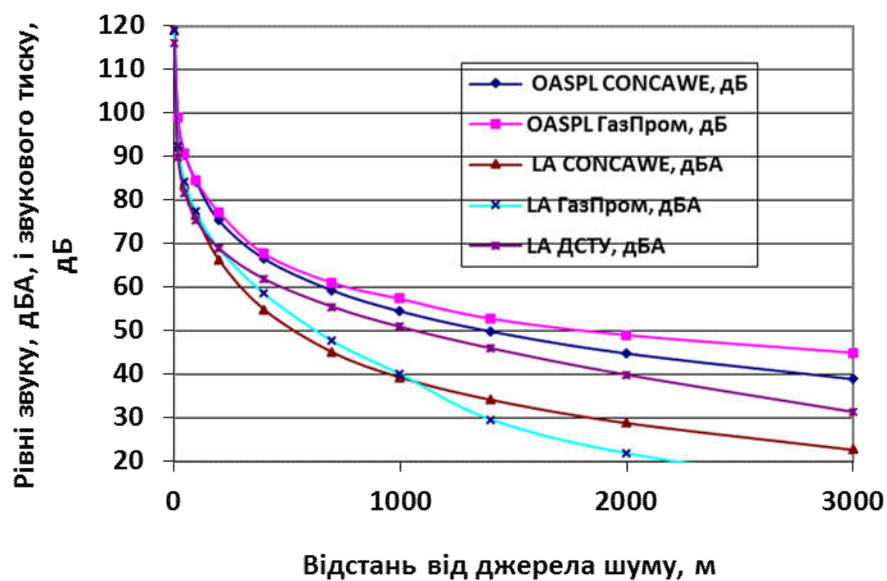


Рисунок 4.6 - Порівняння моделей ГазПрому, ДСТУ та CONCAWE для базової схеми обчислення РЗТ та РЗ для висоти джерела  $H_{дж}=10\text{м}$  в залежності від відстані

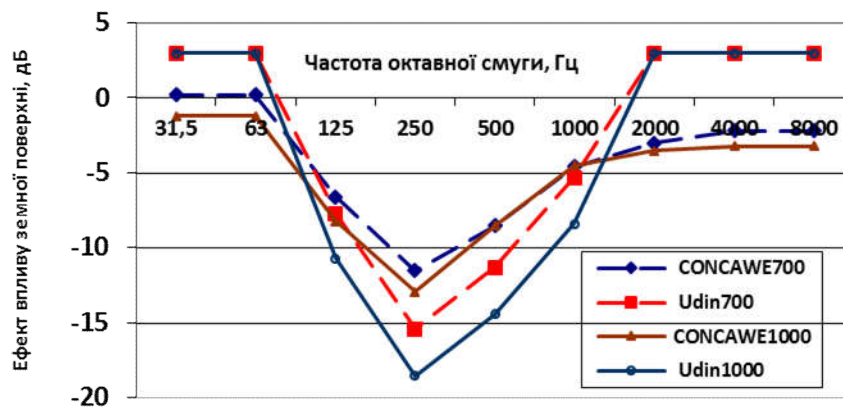


Рисунок 4.7 - Ефект впливу відбиття звукових хвиль поверхнею землі

Модель CONCAWE [132] дозволяє оцінити вплив метеорологічного чинника на рівні звуку для шуму від ГПА в залежності від відстані поширення цього шуму. На рис. 4.8 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) для порівняння між собою. Можна побачити, що в результаті зміни стабільності атмосфери за Пасквілом від категорії А до G РЗ для шуму на відстані 700 м (межа зони безпеки для КС, обладнаної ГПА типу ГТ-750-6 з висотою джерела 10 м), можуть змінюватися **понад 10 дБА** (від 38 дБА для категорії А до 50,6 дБА для категорії G).

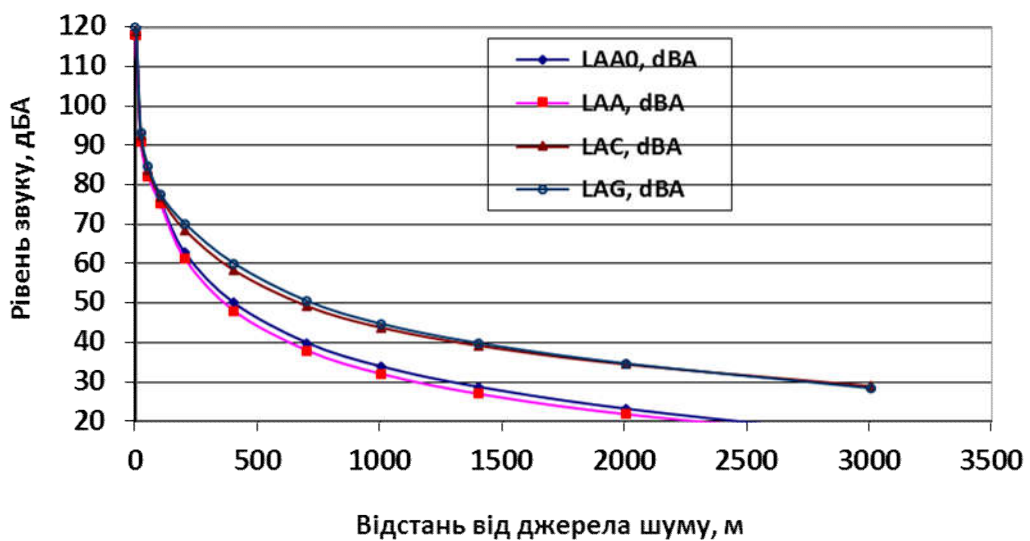


Рисунок. 4.8 - Ефект впливу категорії стану атмосфери Пасквіла на поширення звуку

#### 4.2.4.2. Удосконалення моделі обчислення рівнів звуку від компресорної станції з урахуванням реальних умов експлуатації ГПА

Результати обчислення РЗ та РЗТ для окремих типів ГПА, наведені у попередньому розділі, 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 оцінки 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 в попередньому підрозділі. Рівні звукового тиску  $L_p(f)$  в точці контролю шуму на відстані  $R$  в залежності від частоти  $f$  (як правило, в третино-октавних смугах частот) випромінювання шуму у загальному випадку розраховуються за формулою (4.1), де рівні звукової потужності джерела шуму  $L_W(f)$ , наприклад, ГПА беруться за даними каталогу [31] (приклади в табл. 4.1 та 4.2), але всі обчислення виконуються в третино-октавних смугах частот, що дозволяє більш ретельно оцінювати вплив різних чинників – поглинання звуку в повітрі, ефект впливу земної поверхні  $\Delta L_{gr}$ , що відбиває звукові хвилі, ефект екранування звукових хвиль  $\Delta L_{scr}$ , ефект рефракції звукових хвиль  $\Delta L_{ref}$ , ефект звукоізоляції огорожувальної будівлі  $\Delta L_{tl}$  (розглядається за умови розміщення джерела шуму всередині будівлі – наприклад, для ГТУ в машинному залі КС).

В розділі 3 дисертації показано, що індекс відповідності  $d_2$  акустичної моделі для відстані виконаних вимірювань спектрів шуму для окремих акустичних джерел мають високі значення (0,8...0,9 і більше), що вказує на достатню адекватність моделі, що розробляється (чим ближче значення  $d_2$  до 1 тим адекватність моделі результатам експериментальних вимірювань є більшою). Ефект поглинання звуку в повітрі обчислюється за алгоритмами стандарту [133], а ефект екранування звукових хвиль – за методом Маєкави [134].

Модель (4.1) передбачає випромінювання звуку точковим джерелом, що є наближеною умовою, оскільки реальні акустичні випромінювачі мають кінцеві розміри (приклад технологічної обв'язки ГПА в розділі 3 – рис. 3.20-3.22), що задаються характерним лінійним розміром  $L$  (наприклад, це радіус сферичного випромінювача). Для точкових акустичних джерел звичайно передбачається  $kL \rightarrow 0$ ,

де  $k$  – хвильове число  $k = \frac{\omega}{a_0}$  ( $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ),  $a_0$  – швидкість звуку,  $\omega$  – кругова частота звукової хвилі  $2\pi f$ ,  $\lambda$  – довжина хвилі. Для акустичних джерел кінцевих розмірів поблизу випромінюючої поверхні утворюється ближнє акустичне поле, і в цих областях модель (4.1) може давати наближені оцінки звукового тиску та РЗТ.

Для гармонічних коливань параметри в звуковій хвилі, наприклад, тиск записується у вигляді рішення класичного однорідного хвильового рівняння

$$p'(\vec{x}, t) = p(\vec{x}) \exp(-i\omega t). \quad (4.11)$$

З лінійності рівняння (4.11) та його рішень слідує принцип суперпозиції акустичних хвиль: в лінійному середовищі вільна хвиля розповсюджується незалежно від інших хвиль, а звукове поле являє собою суму окремих вільних хвиль. Принцип суперпозиції виконується, коли для параметрів звукових хвиль виконуються умови малості акустичних збурень в суцільному середовищі поширення хвилі. Навколо точкового джерела гармонічні сферично симетричні хвилі зручно представити у вигляді хвилі з одиничною амплітудою:

$$p = \frac{e^{ikr}}{r}. \quad (4.12)$$

Тобто звуковий тиск (як і РЗТ) в точці на обчислення залежить тільки від частоти хвилі та відстані від джерела випромінювання. До відстаней  $r = \frac{1}{k}$  необхідно враховувати внесок, як хвильового, так і нехвильового члена, а на великих відстанях ( $kr \gg 1$ ) – достатньо тільки хвильового, що добре видно з формули для швидкості часток в звуковій хвилі:

$$v_r = \frac{1}{i\rho_0\omega} \frac{ikr - 1}{r^2} e^{ikr}, \quad (4.13)$$

де складова  $ikr$  визначає внесок хвильового члена, а складова  $-1$  – нехвильового. Для гармонічних коливань відстань, на якій другий доданок є визначальним  $kr \leq 1$ , визначає нехвильову зону сферичної хвилі, а на великих відстанях від джерела  $kr \gg 1$  - хвильову зону. Як правило, при дослідженні шуму довкілля звукова хвиля від джерела шуму розповсюджується до точки його контролю уздовж земної поверхні, яка взаємодіє з звуковою хвилею, частково поглинаючи її енергію (визначається імпедансом поверхні  $Z_0$ ), а решту відбиває (визначається адмітансом поверхні  $\beta$ ) навколишній простір (рис. 4.2). Загальне акустичне поле над імпедансною поверхнею визначається наступним співвідношенням:

$$p_i = -\frac{\exp(ikr_1)}{4\pi r_1} - \frac{\exp(ikr_2)}{4\pi r_2} + p_1 \quad (4.14)$$

де  $r_1$  і  $r_2$  – довжина прямого та відбитого променів від поверхні, що сягають точки контролю шуму (рис. 4.2),  $p_1$  – внесок нехвильової складової в сумарне поле.

Наближене рішення задачі розповсюдження звукової хвилі уздовж імпедансної поверхні записується у вигляді:

$$p_1 \approx \frac{\beta_0 \exp(ikr_2)}{2\pi r_2 (\beta_0 + \cos \theta)} \left[ 1 - \frac{i(1 + \beta_0 \cos \theta)}{r_2 k (\beta_0 + \cos \theta)} \right], \quad (4.15)$$

де  $\theta$  – кут падіння (обернений до кута ковзання  $\psi$  на рис. 4.2), а  $\beta_0$  – нормалізований адмітанс поверхні відбиття хвилі.

Розглянемо відбиття плоскої звукової хвилі від поверхні з акустичним

імпедансом  $Z_s = \frac{p'}{v'_i}$ ,

де  $v'_i$  – компонента нормальної складової швидкості падаючої звукової хвилі.

Звукова хвиля після відбиття може бути представлена у вигляді:

$$p_r = \Re p_i, \quad (4.16)$$

де  $\Re$  – коефіцієнт відбиття звуку від поверхні. Використовуючи співвідношення (4.15), співвідношення для коефіцієнта відбиття записується у вигляді:

$$\Re = \frac{\xi \cos \theta - 1}{\xi \sin \theta + 1}, \quad (4.17)$$

де  $\xi = \frac{Z_s}{\rho_0 a_0}$ .

В моделі (4.1) внесок від прямої хвилі від джерела до приймача враховується складовою  $-10 \lg(4\pi r^2)$  – ефект дивергенції хвилі, а ефект інтерференції прямої та відбитої хвилі – через ефект впливу земної поверхні  $\Delta L_{gr}$ , вказуючи таким чином, що вид покриву та його акустичний імпеданс (або адмітанс) також впливають на результат сумарного акустичного поля в точці контролю.

За своєю структурою модель (4.1) відповідає аналогам ДСТУ [116], Газпрому [128] та CONCAWE [132], її основна відмінність полягає в можливості виконувати обчислення в третино-октавних смугах частот, а також в більш обґрунтованому

обчисленні поправок на ефекти коригування РЗТ уздовж відстані, на яку поширюється звукова хвиля –  $\alpha r$ ,  $\Delta L_{gr}$ ,  $\Delta L_{scr}$ ,  $\Delta L_{ref}$ ,  $\Delta L_{tl}$ .

#### 4.2.4.2.1 Напрацювання моделі впливу ефекту земної поверхні – інтерференції прямої та відбитої звукових хвиль від земної поверхні

Для однорідного випадку повне звукове поле формується за рахунок прямих і відбитих променів (формула (4.15)) відповідно до [136]:

$$\varphi = \frac{\exp(ikr_1)}{4\pi r_1} + \{R(\theta) + (1 - R(\theta)F(p_e))\} \frac{\exp(ikr_2)}{4\pi r_2},$$

де  $\frac{\exp(ikr_1)}{4\pi r_1}$  - акустичне поле прямих променів (формули (4.13 і 4.14)),

$\{R(\theta) + (1 - R(\theta)F(p_e))\} \frac{\exp(ikr_2)}{4\pi r_2}$  – акустичне поле відбитих променів, де  $R(\theta)$  – коефіцієнт відбиття сферичної хвилі від поверхні,  $r_1$  – довжина прямого променя,  $r_2$  – довжина відбитого променя,  $F(p_e)$  – комплексна функція, що враховує взаємодію сферичної хвилі з поверхнею, яка характеризується кінцевим значенням імпедансу покриття поверхні,  $\theta$  – кут падіння звукового променя (рис. 4.2).

Коефіцієнт відбиття сферичної хвилі від поверхні обчислюється за формулою:

$$R(\theta) = R_p + (1 - R_p) * F(p_e),$$

де  $R_p$  – коефіцієнт відбиття від поверхні землі для плоскої звукової хвилі,

$$R_p = \frac{\beta - \cos \theta}{\beta + \cos \theta},$$

$\beta$  – адмітанс поверхні.

Комплексна функція  $F(p_e)$ , яка враховує взаємодію сферичної хвилі з поверхнею та має кінцевий імпеданс, обчислюється наступним чином [136]:

$$F(p_e) = 1 + i\sqrt{p_e} * \exp(-p_e) * \exp(-ip_e),$$

$$p_e = \sqrt{ikr/2} * [\beta + \cos \theta], \quad \beta = 2\pi * \sqrt{1 + (\Delta f / 2f)^2},$$

де  $\Delta f$  – ширина частотної смуги,  $f$  – центральна частота смуги.

Ефект інтерференції для прямих та відбитих променів є результатом різниці їх фаз:  $k(r_1 - r_2)$ . Оскільки хвильове число не є постійним уздовж променів для неоднорідного середовища через швидкість звуку, яка змінюється в залежності від висоти, у цьому випадку різниця у часі розповсюдження хвилі ( $\tau - \tau'$ ) розглядається у евристичній модифікації як один з найважливіших ефектів, що впливає на результуюче звукове поле (рівень звуку) в точці розміщення приймача звуку.

Функція загасання  $F(p_e)$  є комплексною і її модуль може приймати значення, що перевищують 1 (на відміну від результатів аналізу, наведених в [136]). Для поверхні, що абсолютно відбиває ( $Q = 1$ ), акустичне поле в точці розташування приймача визначається сумою полів від дійсного і уявного джерел шуму. 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 інтерференції звукових хвиль на характеристики шуму в точці прийому здійснюється за формулою

$$\Delta L_{INT} = 10 \lg \{ 1 + S^2 |Q|^2 + 2S|Q| * [\sin(\alpha * dR/\lambda) / (\alpha * dR/\lambda)] \cos[\beta * dR/\lambda + \delta] \}, \quad (4.18)$$

де  $S = R_1/R_2$ ,  $dR = (R_2 - R_1)$ ,  $\alpha = \pi(df/f_i)$ ,

$df$  - ширина частотної смуги,

$f_i$  - центральна частота смуги,

$\lambda$  - довжина хвилі,  $\beta = 2\pi[1 + (df/f_i)^2/4]^{1/2}$ , для 1/3-октавних смуг  $\alpha = 0,725$ ,  $\beta = 6,325$ .

Для оцінки акустичних властивостей зовнішніх поверхонь, що відбивають звукові промені, застосована широко відома модель [137], яка для обчислення імпедансу поверхні включає один параметр для характеристики покриття поверхні – „ефективний” опір потоку,  $\sigma_e$ . Згідно з цією однопараметричною моделлю, постійна поширення звуку  $k$  та нормований характеристичний імпеданс  $Z$  визначаються формулами:



$$\frac{k}{k_1} = \left[ 1 + 0.0978(f/\sigma_e)^{-0.700} - j0.189(f/\sigma_e)^{-0.595} \right]$$

$$Z = \frac{\rho_1 c_1}{\rho c} = 1 + 0.0571(f/\sigma_e)^{-0.754} - j0.087(f/\sigma_e)^{-0.732} \quad (4.19)$$

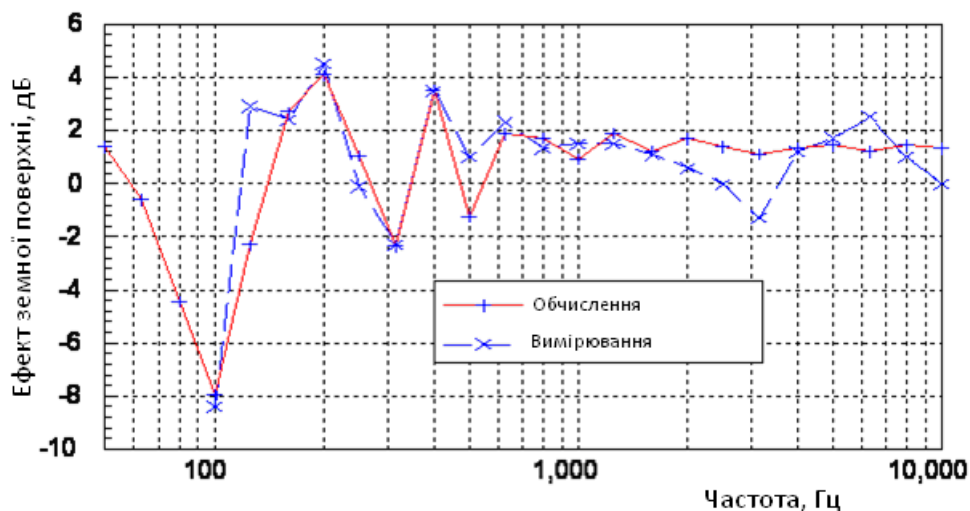
РЗТ шуму в точці прийому звуку з урахуванням явища інтерференції розраховуються за формулою:

$$L(f) = L_o(f) + \Delta L_{INT}, \quad (4.20)$$

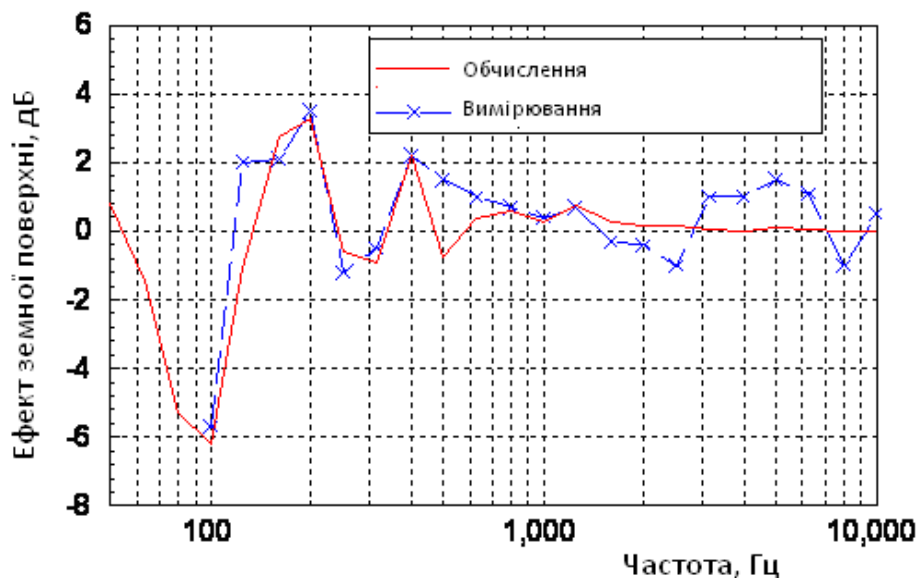
де  $L_o(f)$  - спектральні складові шуму для умов вільного акустичного поля (для прямої звукової хвилі).

Запропонована модель оцінки "впливу земної поверхні" на рівні звуку та звукового тиску (інтерференції звукових хвиль уздовж шляху поширення між джерелом шуму і точкою його контролю) реалізована в модулі LATER моделі NoBel, що дозволяє в залежності від геометричної схеми і виду відбиваючих поверхонь розрахункового варіанта визначати складові  $\Delta L_{INT}(f)$  в досліджуваних смугах спектра.

Аналіз моделі (4.14-4.20) показує, що вплив ефекту "земної поверхні" на рівні звуку в контрольній точці залежить від спектра випромінювання шуму джерелом, геометрії розрахункової схеми ( $R$ ,  $h_s$  і  $h_r$  на рис. 4.2), імпедансних характеристик поверхні відбивання звукової хвилі. Зокрема, на рис. 4.9 показані результати експериментальних досліджень ефектів впливу різних поверхонь, що відбивають (акустично жорстких, виготовлених з бетону - рис. 4.9а, і акустично м'яких - виготовлених з матеріалу різної пористості і товщини покриття - рис. 4.9б, в даному разі пінопласт товщиною пластин 10 см) в околиці натурального вимірювального стенда дослідження шуму струменів газів, що відпрацювали і розраховані результати по моделі (4.14-4.20) за допомогою програми LATER. Висота приймача становить 1,5 м, висота точкового акустичного джерела (встановлення двигуна на стенді) становить 4,5 м, а горизонтальна відстань між двигуном та мікрофоном становить 50 м. Прогноз передбачав обчислення імпедансу для бетону і пінопласту напівемпіричною однопараметричною моделлю (4.19) [137] з ефективним опором потоку  $\sigma = 20000 \text{ кПа с м}^{-2}$  і  $2000 \text{ кПа с м}^{-2}$  відповідно.



а)



б)

Рисунок 4.9 - Порівняння між обчисленими та виміряними спектральними ефектами земної поверхні на випробувальному стенді двигуна з бетонною (а) та пінопластовою (б) поверхнею поверхнями відбиття звуку: червона суцільна лінія – розрахунок; синя штрихова лінія – вимірювання

#### 4.2.4.2.2 Дослідження впливу типу покриття земної поверхні, що відбиває звукові хвилі

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 і відповідних метеорологічних параметрів (в даному разі особливо

важливою є температура повітря, яка впливає на стан покрову), так і діяльності людини (прооране поле, засіяне поле і сходи тільки вийшли на поверхню – типу газон або пасовище, засіяне поле і сходи є високими над на поверхнею, сніжний покрив, твердий ґрунт, асфальто-бетон, тощо). Тип поверхні визначає параметр «ефективного» опору потоку  $\sigma_e$  у вище наведеній моделі обчислення її імпедансних властивостей, значення якого в залежності від типу поверхні, що спостерігається в околиці КС, наведені в табл. 4.4 за даними різних літературних джерел [137-140].

Таблиця 4.4 - Значення виміряного опору потоку  $\sigma_e$  від типу покрову земної поверхні, що відбиває звукові хвилі

Тип поверхні землі	Опір потоку, $\sigma_e$ кПа с/м <sup>2</sup>
Сніг	10–50
М'яка лісова підлога, вкрита сосною хвою	160
Ґрунт, вкритий листям і гілочками	160–250
Ґрунт, змішаний з тирсою	250
Відносно щільний ґрунт, слабо покритий травою та/або іншою низькою зеленню	630
Грубі луки та пасовища	100–300
Газон	250–400
Сільськогосподарське поле	160–250
Твердий ґрунт	400–2000
Ґрунт, оголений та упакований дощем	4000–8000
Змішана бруківка та трава	630–2000
Старе гравійне поле з рідкісною рослинністю	2000
Асфальт, ущільнений пилом і світлом, використовують	30000
Бетон	20000

Відповідно для основного розрахункового сценарію обчислення рівнів звуку та РЗТ від окремої ГПА обчислені їх залежності від типу покрову (значення ефективного опору потоку покрову  $\sigma_e = 50 \dots 20000$  кПа·с·м<sup>-2</sup>). Зокрема для приведеної висоти джерела шуму ГПА 10 м РЗ на межі безпекової зони навколо КС (700 м [59]) можуть змінюватись в межах 10 дБА в результаті зміни покрову від акустично дуже м'якого

(сніг) до дуже жорсткого (асфальто-бетон або водний покрив) – рис. 4.10. Аналогічні залежності спостерігаються для сумарних РЗТ шуму від ГПА – рис. 4.11.

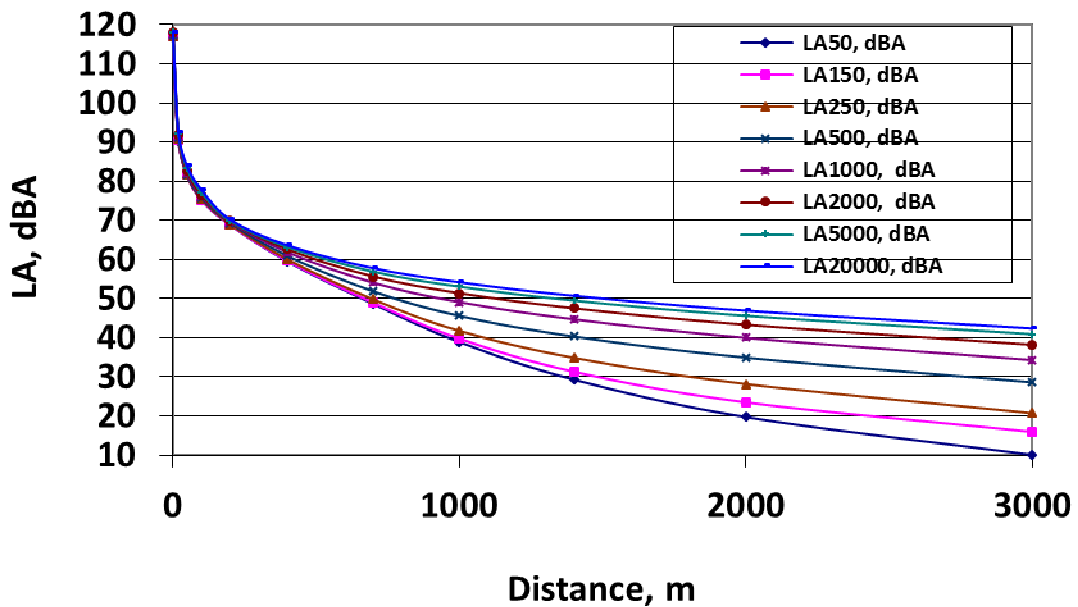


Рисунок 4.10 - Залежності рівнів звуку  $L_A$  від окремої ГПА (висота джерела шуму 10 м) від ефективного опору потоку покриття  $\sigma_e$  поверхні ( $50 \dots 20000$  кПА  $\cdot$  с  $\cdot$  м $^{-2}$ ), що відбиває звукові хвилі

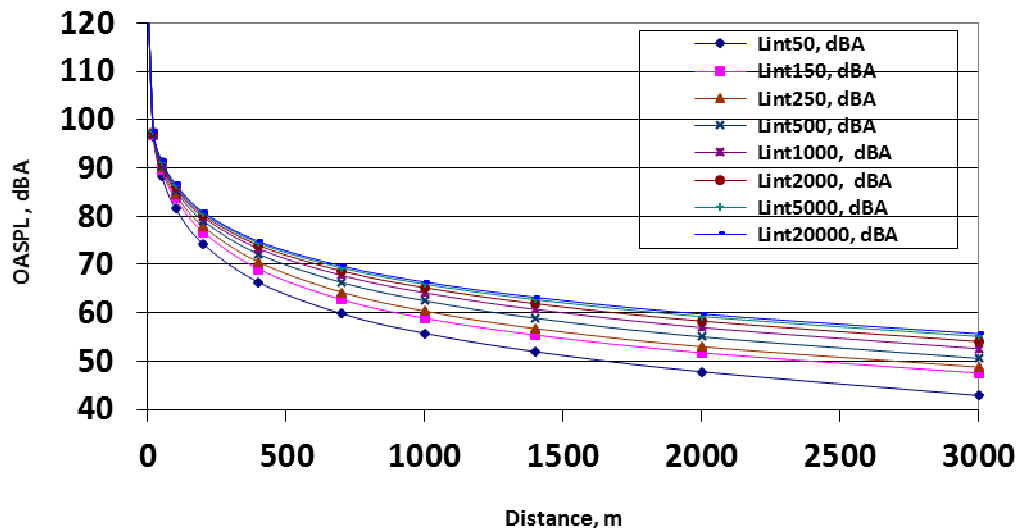


Рисунок 4.11 - Залежності сумарних рівнів звукового тиску OASPL від окремої ГПА (висота джерела шуму 10 м) від ефективного опору потоку покриття  $\sigma_e$  ( $50 \dots 20000$  кПА  $\cdot$  с  $\cdot$  м $^{-2}$ )

Для дистанції 700 м від джерела шуму до точки його контролю (радіус границі без пекової зони для КС І класу небезпеки [59]) залежності РЗ від ефективного опору потоку покриву  $\sigma_e$  наведені в табл. 4.5 та рис. 4.12. Вплив акустично м'якого покриву є більш відчутним, для зміни опору потоку покриву в межах  $\sigma_e = 50-1000$  кПа·с·м<sup>-2</sup> різниця  $\Delta L_A = L_{A\sigma} - L_{A1000}$  майже вдвічі переважає аналогічно для акустично жорстких типів покриву поверхні що відбиває звукові хвилі.

Таблиця 4.5 - Залежності РЗ  $L_A$  та сумарних РЗТ OASPL від окремої ГПА (висота джерела шуму 10 м) від ефективного опору потоку покриву  $\sigma_e$  поверхні, що відбиває звукові промені, на відстані межі безпекової зони КС (700 м)

	Ефективний опір потоку покриву $\sigma_e$ , кПа·с·м <sup>-2</sup>							
	50	150	250	500	1000	2000	5000	20000
$L_A$ , дБА	48,65	48,95	49,79	51,84	54,07	55,66	56,89	57,78
OASPL, дБ	59,81	62,74	64,28	66,29	67,76	68,66	69,30	69,69

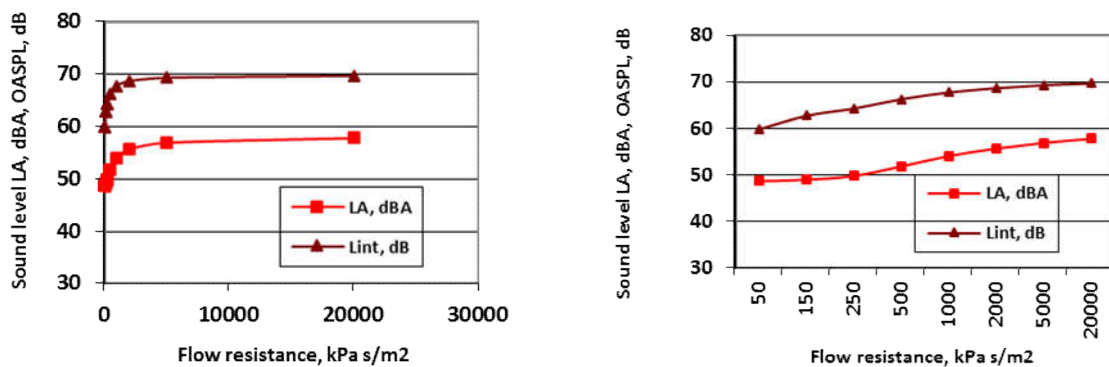


Рисунок 4.12 - Залежності РЗ  $L_A$  та сумарних РЗТ OASPL ( $L_{int}$ ) від окремої ГПА (висота джерела шуму 10 м) від ефективного опору потоку покриву  $\sigma_e$  поверхні, що відбиває звукові промені, на відстані межі безпекової зони КС (700 м): а) лінійна шкала для опору потоку покриву – чітко видно діапазони акустично м'яких (< 1000) та жорстких (> 1000) типів покриву; б) аналогічно а), але шкала для опору потоку покриву нелінійна

Спектральний ефект земної поверхні на РЗТ в третино-октавних смугах частот в залежності від опору потоку покриття  $\sigma_e$  на відстані межі безпекової зони КС (700 м) наведений на рис. 4.13. 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 мінімальних значень опору потоку (акустично дуже м'яких покриттів поверхні відбиття).

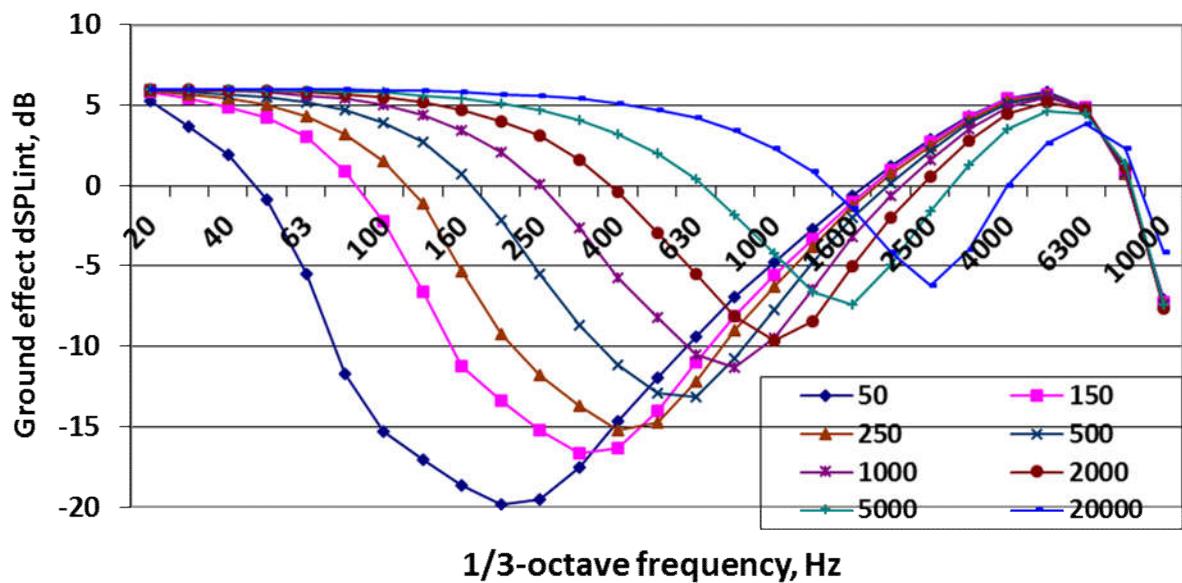


Рисунок 4.13 - Ефект земної поверхні на РЗТ поширення звуку в третино-октавних смугах частот (висота джерела шуму 10 м) від ефективного опору потоку покриття  $\sigma_e$  на відстані межі безпекової зони КС (700 м)

Відповідно змінюються спектральні РЗТ в третино-октавних смугах частот для шуму від ГПА в залежності від опору потоку покриття  $\sigma_e$  на відстані межі безпекової зони КС (700 м) наведений на рис. 4.14: в смугах низьких та середніх (100-1000 Гц) частот значення РЗТ можуть відрізнятися до 20 дБ, максимальні спектральні РЗТ спостерігаються для акустично дуже жорстких типів покриття (бетон, асфальт, водний покриття).

Висота джерела шуму, наприклад у результаті приведення до висоти встановлення ГТУ або всмоктування повітря в ГПА (орієнтовно  $H_{дж} = 3$  м), принципово не змінює загальний характер залежностей, що отримані для висоти  $H_{дж}$

=10м. Але при зменшенні висоти джерела ефекти послаблення РЗТ та РЗ збільшуються, що очевидно показано на рис. 4.15 – 4.19 відповідно, особливо для акустично дуже м'яких типів покриття поверхні, що відбиває звукові хвилі (очевидно з рис. 4.19 і табл. 4.6 у порівнянні з рис. 4.15 для дистанції, що дорівнює радіусу безпекової зони навколо КС).

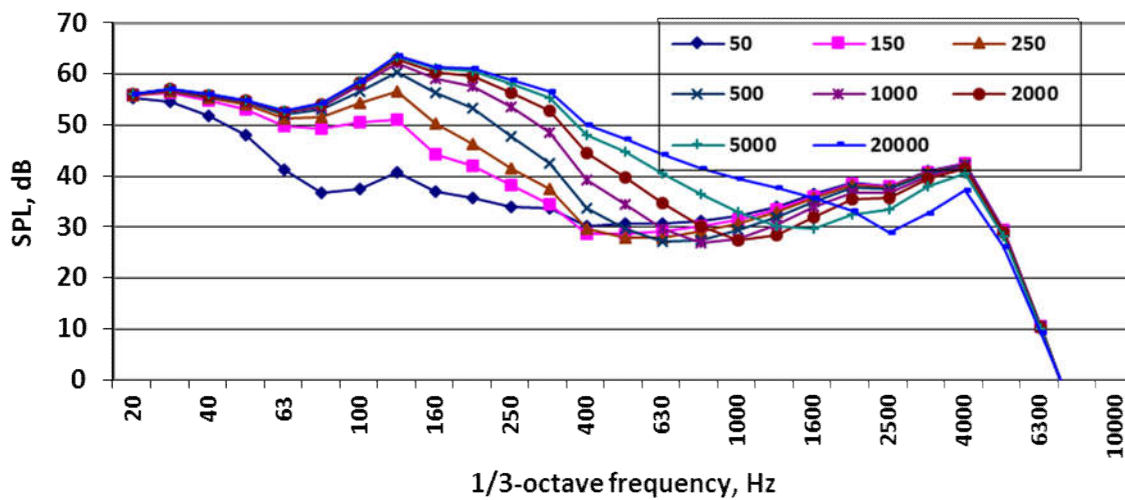


Рисунок 4.14 - Спектральні РЗТ в третино-октавних смугах частот (висота джерела шуму 10 м) від ефективного опору потоку покриття  $\sigma_e$  на відстані межі безпекової зони КС (700 м)

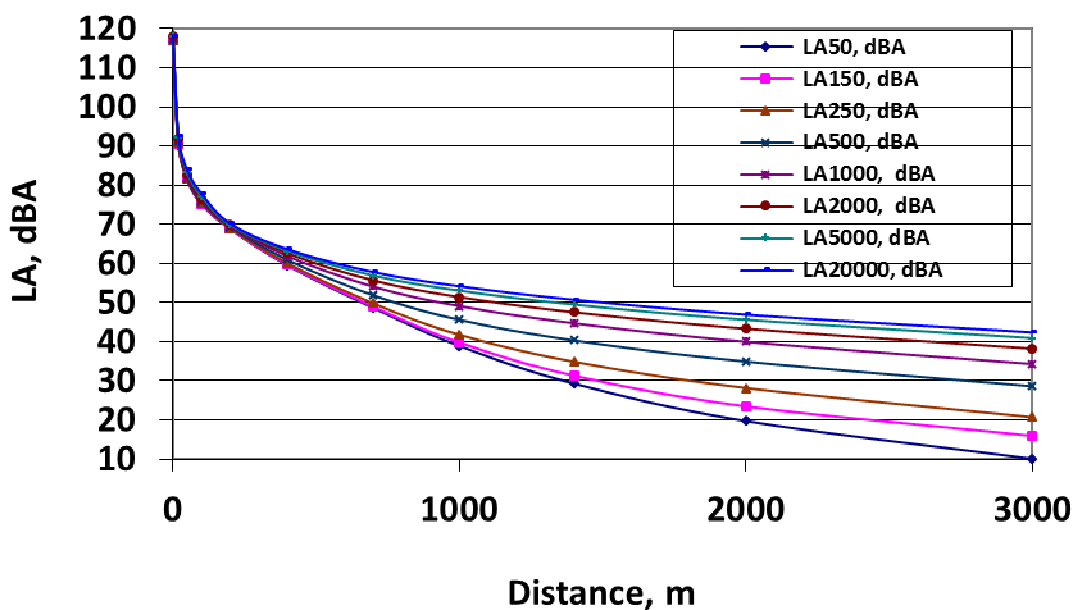


Рисунок 4.15 - Залежності рівнів звуку  $L_A$  від окремої ГПА (висота джерела шуму 3 м) від ефективного опору потоку покриття  $\sigma_e$

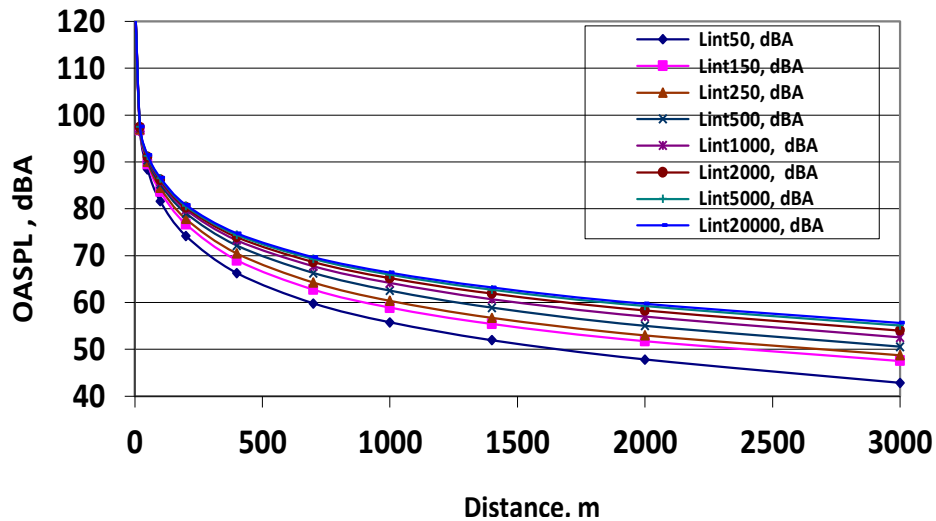


Рисунок 4.16 - Залежності сумарних рівнів звукового тиску OASPL від окремої ГПА (висота джерела шуму 3 м) від ефективного опору потоку покритву  $\sigma_e$

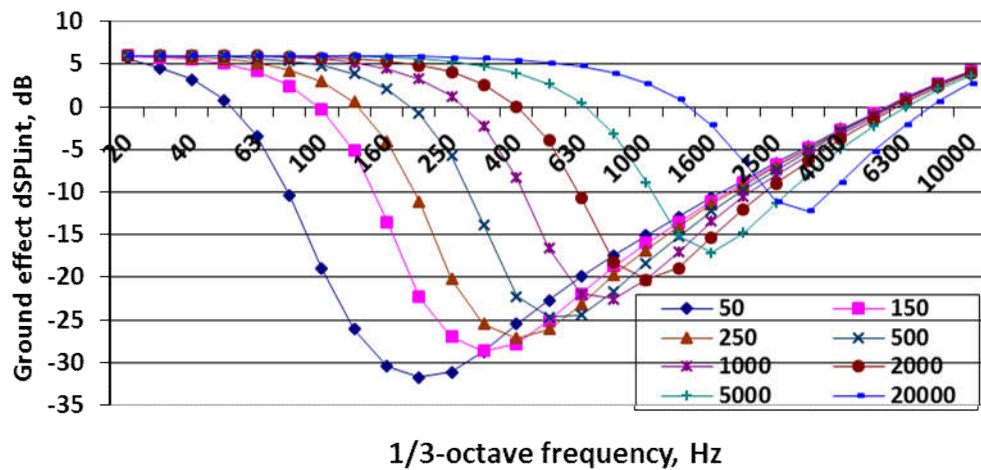


Рисунок 4.17 - Ефект земної поверхні на РЗТ в третино-октавних смугах частот (висота джерела шуму 3 м) від ефективного опору потоку покритву  $\sigma_e$  на відстані межі без пекової зони КС (700 м)

Таблиця 4.6 - Залежності РЗ  $L_A$  та сумарних РЗТ OASPL від окремої ГПА (висота джерела шуму 3 м) від ефективного опору потоку покритву  $\sigma_e$  на відстані межі без пекової зони КС (700 м)

	Ефективний опір потоку покритву $\sigma_e$ , кПА·с·м <sup>-2</sup>							
	50	150	250	500	1000	2000	5000	20000
$L_A$ , дБА	39,84	42,92	46,38	50,95	54,11	55,90	57,11	57,94
OASPL, дБ	60,34	63,29	64,98	67,03	68,38	69,13	69,58	69,81



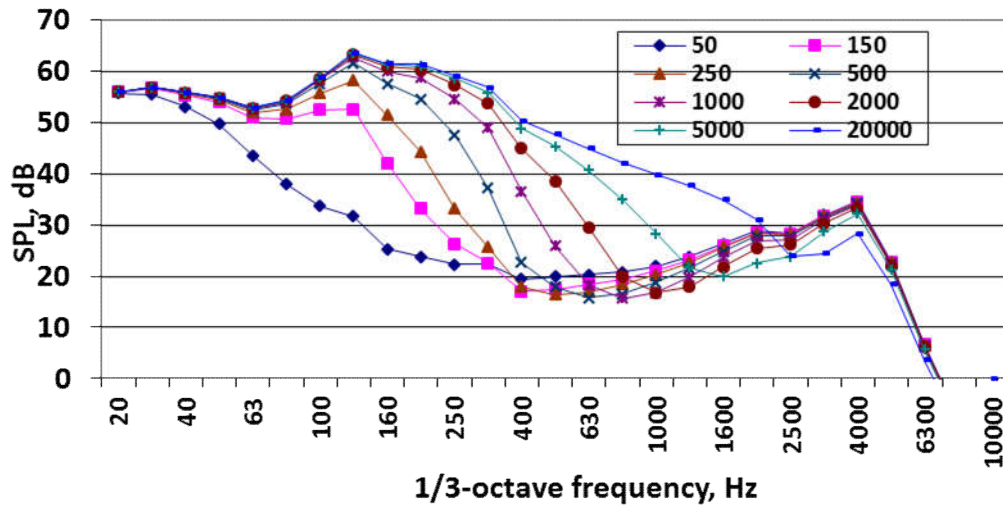


Рисунок 4.18 - Спектральні РЗТ в третино-октавних смугах частот (висота джерела шуму 3 м) від ефективного опору потоку покритву  $\sigma_e$  на відстані межі без пекової зони КС (700 м)

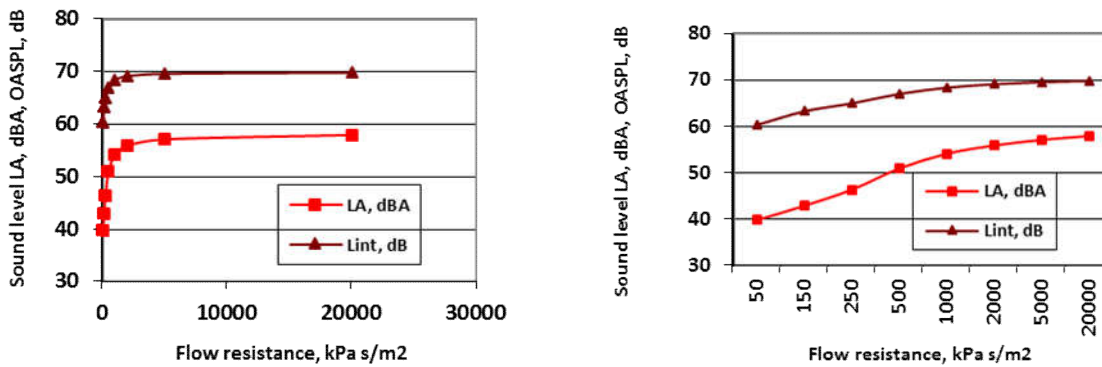


Рисунок 4.19 - Залежності РЗ  $L_A$  та сумарних РЗТ OASPL від окремої ГПА (висота джерела шуму 3 м) від ефективного опору потоку покритву  $\sigma_e$  на відстані межі без пекової зони КС (700 м) (за даними табл. 4.6): а) лінійна шкала для опору потоку покритву – чітко видно діапазони акустично м'яких (< 1000) та жорстких (> 1000) типів покритву; б) аналогічно а), але шкала для опору потоку покритву нелінійна

Сучасні методики та моделі обчислення рівнів звуку РЗ та звукового тиску РЗТ від компресорних станцій застосовують принцип доміантного джерела шуму, до координат якого приводяться координати всіх акустичних джерел, які беруться до розрахунку у кожному конкретному випадку. Приклад наведено у табл. 4.1 з вимірними значеннями рівнів звукової потужності в октавних смугах частот (та їх кориговані за шкалою «А» РЗ) основних джерел шуму та ГПА ГТ-750-6 у цілому.

Для відстаней обчислення РЗ та РЗТ шуму від КС на межі її зони безпеки (300-700 м в залежності від класу газогону в зоні розміщення КС та діаметру труби) в багатьох випадках такий принцип є доцільним. Наприклад, на рис. 4.20а всі результати обчислення отримані для умови, що всі джерела (всі ГПА) приведені до координати центру компресорного цеху, що в принципі підтверджується результатами обчислення для розподіленого розміщення ГПА (у кількості 4 шт.) за їх координатами на території КС (цеху) – на рис. 4.20б.

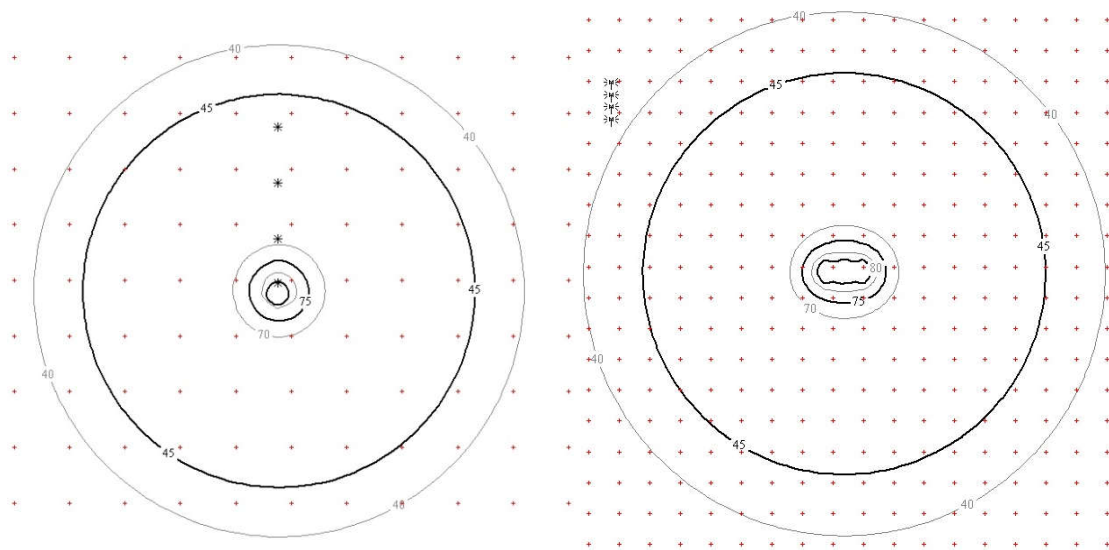


Рисунок 4.20 - Результати обчислення контурів рівнів звуку для шуму від джерел КС: а) варіант приведеної звукової потужності до однієї координати в центрі компресорного цеху; б) варіант 4 ГПА з визначеними координатами для кожного з них

Особливо принцип приведення координат усіх домінантних джерел шуму до координати центру компресорного цеху, якщо обчислювальна модель застосовується для умов однорідної атмосфери (метеорологічні параметри в межах території обчислення є сталими у часі та постійними величинами – незалежними від висоти над поверхнею землі). В першу чергу це стосується напрямку і швидкості вітру та градієнту температури в атмосферному повітрі, які можуть спричинити наявність градієнта швидкості звуку над поверхнею землі, які в свою чергу зумовлюють ефекти рефракції звукових хвиль.

Відповідно до Каталогу [31] розроблена база даних рівнів звукової потужності для основних джерел шуму на КС (БД *ШумКС*), що знаходяться в експлуатації ГТС України. БД *ШумКС* може бути застосована до обчислення РЗТ та РЗ з метою обґрунтування достатності радіусу зони безпеки навколо КС, що встановлюється відповідно із законом України про безпеку ГТС [59, 60].

#### **Висновки по Розділу 4**

1. Розроблена акустична модель окремої ГПА та КС у цілому, яка враховує рівні звукової потужності в третино-октавних частотних смугах, а також ефекти поглинання звуку в повітрі, ефект впливу земної поверхні, що відбиває звукові хвилі, ефект екранування звукових хвиль, ефект рефракції звукових хвиль, ефект звукоізоляції огорожувальної будівлі (розглядається за умови розміщення джерела шуму всередині будівлі – наприклад, для ГТУ в машинному залі КС). Показано, що індекс відповідності  $d_2$  акустичної моделі для відстані виконаних вимірювань спектрів шуму для окремих акустичних джерел ГПА-25И (КС Золотоноша) мають високі значення (0,8...0,9 і більше), що вказує на достатню адекватність моделі, що розробляється.

2. Протягом року від покриття земної поверхні, що відбиває звукові хвилі при розповсюдженні шуму від КС, змінюється як завдяки змінам сезону року і відповідних метеорологічних параметрів, так і діяльності людини. Тип поверхні визначає параметр «ефективного» опору потоку  $\sigma_e$ , який у свою чергу є визначальним для її імпедансних властивостей. Значення «ефективного» опору потоку в залежності від типу поверхні, що спостерігається в околиці КС, наведені і досліджені в роботі на їх вплив на рівні звуку та звукового тиску при розповсюдженні звуку за межами станції. При зміні ефективного опору потоку покриття  $\sigma_e$ , від 50 (акустично м'яка поверхня) до 20000 (акустично тверда поверхня)  $\text{кПА} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-2}$  рівні звуку та звукового тиску можуть збільшуватись до 10 дБ на межі охоронної зони КС.

3. Вплив метеорологічного чинника на рівні звуку для шуму від ГПА в залежності від відстані поширення цього шуму досліджений для категорій

стабільності атмосфери Пасквіла А...G: при зміні стабільності атмосфери від категорії А (велике зниження температури з висотою) до G (температурна інверсія) РЗ для шуму на відстані 700 м (висота джерела 10 м) можуть змінюватися понад 10 дБА. Вплив метеорологічного чинника визначає умови рефракції звукової хвилі [142], яка об'єктивно спостерігається завжди [143], тому що в умовах реальної атмосфери постійно спостерігається градієнт температури повітря з висотою над поверхнею землі, а за наявності вітру ефект рефракції може бути набагато більшим у напрямку вітру.

4. Умови обчислення РЗ та РЗТ для шуму компресорної станції, що є несприятливими для утворення високих рівнів, які перевищують допустимі значення на межі охоронної зони КС, відповідають метеорологічним умовам категорії F і G за Пасквілолом, і умовам акустично «м'яких» покривів відбиваючої звук земної поверхні. Рівні звуку на межі охоронної зони КС в таких випадках перевищують нормативні значення стандартів та санітарних правил і границі СЗЗ навколо КС розташовуються за межами охоронної зони.

## 5. ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ ВИКИДАМИ ВІД КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ

### 5.1. Особливості джерел забруднення повітря в районі розташування компресорних станцій

Особливості розвитку газопровідного транспорту зумовили високу концентрацію потужних ГПА на невеликих площах, що додатково ускладнює екологічну обстановку в районах розташування компресорних станцій магістральних газопроводів. Під час експлуатації КС, як показано в розділі 1 дисертації, від роботи ГПА передбачається шумовий вплив та викиди ЗР в атмосферне повітря, з відпрацьованими газами ГТУ (понад 90% загальних викидів ЗР джерелами КС). Ця ситуація настійно диктує розвиток методів і розробку шляхів зниження емісії оксидів азоту від ГПА (ГТУ).

Компресорні станції та окремі ГПА газотранспортної системи дуже подібні до джерел забруднення повітря в районі аеропорту [144]. У більшості випадків в основу конструкції ГПА на КС покладені або авіаційні двигуни, що відпрацьовали свій льотний ресурс, або їх цільові модифікації на виконання завдань ГПА та КС в різних ГТС [145]. До 90 % парку ГПА в експлуатації не відповідають вимогам санітарних та технічних норм по емісії та шуму.

Продукти згоряння природного газу, що спалюється в камері згоряння ГТУ, надходять в атмосферне повітря через вихлопні труби (шахти), які розглядаються як організовані джерела викидів ЗР при роботі ГПА. Серед них є оксиди азоту, оксиди вуглецю, вуглеводні, в тому числі бенз(а)пірен, і інші речовини. Вимоги стандартів щодо емісії  $\text{NO}_x$  і  $\text{CO}$  у відпрацьованих газах ГТУ розглянуті в розділі 1 [19, 147–148]. Кількість ЗР, що викидаються, змінюється в залежності від типу ГТУ в досить широкому діапазоні. Так, максимальною потужністю викидів оксидів азоту характеризується ГТ-750-6 (15,5 г/с), а мінімальним – ГПА-Ц-6,3 (3,04 г/с). За потужністю викидів оксиду вуглецю максимальні значення характерні для ГТН-25 (39,2 г/с), а мінімальні - для ГПУ-16 (0,73 г/с) [19].

Зберігання нафтопродуктів на КС здійснюється на сховищах паливно-мастильних матеріалів (ПММ), зазвичай розподілених по цехах. Викид парів

нафтопродуктів в атмосферу відбувається з дихальних клапанів резервуарів зберігання (мале дихання), а також з вентиляційних систем приміщень сховищ ПММ. Основний обсяг викидів ЗР в атмосферу від випаровування нафтопродуктів в резервуарах відбувається за рахунок витіснення газоповітряної суміші з резервуара в процесі його заповнення (велике дихання).

Таким чином, для КС є характерною наявність широкого кола стаціонарних джерел з різноманітними параметрами організації викиду в атмосферу. Чинна нормативна методика ОНД-86 [63] не покриває увесь можливий для КС інтервал параметрів викидів стаціонарних джерел, що або обмежує її застосування, або спричиняє невірний результат обчислення. Тому вивчення умов функціонування стаціонарних джерел КС є актуальною задачею, і як наслідок - визначення обмежень застосування нормативної методики оцінки концентрацій в атмосферному повітрі та напрацювання пропозицій стосовно нових її алгоритмів обчислення, що поширюватиметься на характерні умови для стаціонарних джерел аеропортів та КС. *Метою* даного завдання є удосконалення моделей оцінки забруднення повітря викидами стаціонарних джерел компресорних станцій шляхом урахування параметрів джерел викиду та особливостей утворення й розсіювання викидів вітром та атмосферою турбулентністю [122, 123].

Для досягнення цієї мети були сформульовані наступні задачі:

- дослідити умови викиду ЗР з відпрацьованими газами ГТУ через шахти витоку газів ГПА;
- обчислити максимальну приземну концентрацію вздовж усередненої вісі шлейфу викиду та максимальну поперечно-інтегровану концентрацію для умов тестового сценарію на основі рекомендованих моделей ІСАО [150]. Виявити залежності зазначених концентрацій від відстані до стаціонарного висотного джерела;
- обчислити максимальну приземну концентрацію вздовж усередненої вісі шлейфу викиду та максимальну поперечно-інтегровану концентрацію для тих же умов тестового сценарію з використанням моделі та програми обчислення PolEmission і зробити рекомендації по її удосконаленню.

### 5.1.1. Умови викиду ЗР з відпрацьованими газами ГТУ через шахти витоку газів ГПА і його розсіювання в атмосфері

Перенесення та розсіювання домішок у турбулентній атмосфері відбувається внаслідок крупномасштабних, двомірних рухів потоків (перенесення вітром) та дрібномасштабних, тримірних, турбулентних пульсацій, в тому числі від стаціонарних та пересувних джерел КС [151, 152].

Аналіз досліджень з теорії атмосферної дифузії [151-154] було виконано для удосконалення вітчизняної нормативної методики [63] розрахунків розповсюдження забруднень у атмосферному повітрі з урахуванням впливу стратифікації на механізми атмосферної дифузії. Для опису атмосферної дифузії необхідні відомості про вертикальний профіль вітру та статистичні характеристики турбулентного поля швидкості за різних умов атмосферної стратифікації [153]. Так, за умовами стійкої стратифікації атмосфери турбулентна дифузія відбувається повільно, а забруднення переносяться вітром, майже не розсіюючись. В умовах конвекції (нестійка стратифікація), навпаки, турбулентна дифузія відбувається інтенсивно та спричиняє швидке розсіювання домішок [153].

Підстеляюча земна поверхня суттєво впливає на характер атмосферної дифузії. Забруднення може або затримуватися поверхнею – «поглинання» (зменшення концентрації у порівнянні з умовами вільного середовища), або «віддзеркалюватися» від неї (відповідно збільшення концентрації), або ж можливі проміжні випадки комбінації «віддзеркалення» та «поглинання». Відповідно, під час математичного формулювання граничних умов для атмосферної дифузії поблизу земної поверхні необхідно враховувати ступінь її шорсткості та здатність до поглинання (віддзеркалення) домішок ЗР [153, 154].

В усіх перелічених вище випадках визначальною для оцінки концентрації є висота викиду в атмосферне повітря – як геометрична висота гирла джерела викиду  $H$ , так і висота спливання газів  $\Delta H_{ef}$  понад гирлом за рахунок швидкості потоку газів  $w_0 = V_1 / (\pi D^2 / 4)$ , так температури газів  $T_2$  в перерізі гирла, де  $V_1$  – об'єм газів, що витікає з гирла джерела в одиницю часу,  $D$  – діаметр гирла. Визначальною для концентрації є значення ефективної висоти  $H_{ef} = H + \Delta H_{ef}$ . Діапазон значень

швидкості  $w_0$  та температури витоку газів  $T_2$  для стаціонарних джерел на КС є широким, починаючи з умов нейтрального (або пасивного) шлейфу викиду газів, коли висота спливання газів  $\Delta H_{ef}$  є відсутньою, тобто ефективної висота  $H_{ef}$  дорівнює геометричній висоті  $H$  джерела викиду, тому що суміш газів в шлейфі є ні легшою, ні важчою за повітря навколо джерела.

Особливості конструкції шахти витоку газів ГПА, що відпрацювали в ГТУ, у більшості випадків зумовлюють відсутність вертикальної складової швидкості  $w_0$  для об'єму газів  $V_1$ , що витікає з гирла джерела в одиницю часу, а саме обладнання гирла шахти дефлекторами захисту від метеопадів (рис. 5.1).

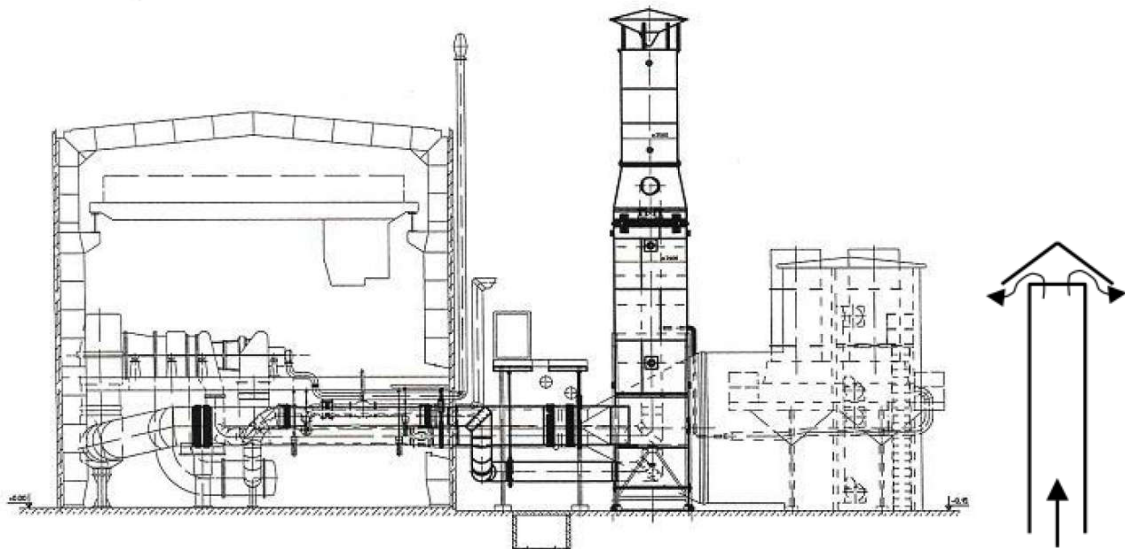


Рисунок 5.1 - Компонування ГПА ГТ-750-6 з газовою турбіною з горизонтальною камерою згоряння: а) шахта витоку газів обладнана дефлекторами захисту від метеопадів; б) схема витоку газів через гирло шахти

Максимальне значення приземної концентрації шкідливої речовини  $c_m$  ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ) при викиді газоповітряної суміші з одиночного точкового джерела з круглим гирлом за основною формулою методики ОНД-86 [63] досягається при несприятливих метеорологічних умовах на відстані  $x_m$  (м) від джерела і визначається за формулою:

$$c_m = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot m \cdot n \cdot \eta}{H^2 \cdot \sqrt[3]{V_1 \cdot \Delta T}} \quad (5.1)$$

де  $A$  - коефіцієнт, що залежить від температурної стратифікації атмосфери;  $M$  (г/с) - маса шкідливої речовини, що викидається в атмосферу в одиницю часу;  $F$  - безрозмірний коефіцієнт, що враховує швидкість осідання шкідливих речовин в



атмосферному повітрі;  $m$  і  $n$  - коефіцієнти, враховують умови виходу газоповітряної суміші з гирла джерела викиду;  $H$  (м) - висота джерела викиду над рівнем землі;  $\eta$  - безрозмірний коефіцієнт, що враховує вплив рельєфу місцевості, в разі рівної або слабо пересіченої місцевості  $\eta = 1$ ;  $\Delta T$  (°C) - різниця між температурою, що викидається газоповітряної суміші  $T_2$  і температурою навколишнього атмосферного повітря  $T_{амм}$ ;  $V_1$  (м<sup>3</sup>/с) - об'єм газів, що витікає з гирла джерела. Значення коефіцієнтів  $m$  і  $n$  визначаються в залежності від параметрів  $f$ ,  $v_m$ ,  $v'_m$  і  $f_e$ :

$$f = 1000 \frac{\omega_0^2 D}{H^2 \Delta T}; \quad v_m = 0,65 \sqrt[3]{\frac{V_1 \Delta T}{H}}; \quad v'_m = 1,3 \frac{\omega_0 D}{H}; \quad f_e = 800(v'_m)^3. \quad (5.2)$$

Коефіцієнт  $m$  визначається в залежності від  $f$  за формулами:

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1\sqrt{f} + 0,34 \sqrt[3]{f}} \quad \text{при } f < 100; \quad m = \frac{1,47}{\sqrt[3]{f}} \quad \text{при } f \geq 100. \quad (5.3)$$

Для  $f \geq 100$  (чи  $\Delta T \approx 0$ ) і  $v'_m \geq 0,5$  (холодні викиди) при обчисленні  $c_m$  замість формули (1) використовується формула

$$c_m = \frac{A M F n \eta}{H^{4/3}} K, \quad \text{де } K = \frac{D}{8V_1} = \frac{1}{7,1 \sqrt{\omega_0 V_1}}. \quad (5.4)$$

Аналогічно при  $f < 100$  і  $v_m < 0,5$  чи  $f \geq 100$  і  $v'_m < 0,5$  (випадки гранично малих небезпечних швидкостей вітру) розрахунок  $c_m$  замість (1) виконується за формулою

$$c_m = \frac{A M F m' \eta}{H^{7/3}}, \quad (5.5)$$

де  $m' = 2,86m$  при  $f < 100$ ,  $v_m < 0,5$ ;  $m' = 0,9$  при  $f \geq 100$ ,  $v'_m < 0,5$ .

У багатьох випадках гирла шахт витоку газів обладнані дефлекторами, в тому числі для захисту від атмосферних опадів. Це зумовлює зміну вектора швидкості потоку у гирлі труби на горизонтальний (або під певним кутом до горизонту, рис. 5.1б) від вертикального, тобто об'єм газів, що витікає з гирла джерела,  $V_1 > 0$ , а вертикальна складова швидкості цього потоку  $w_0 = 0$ . Вертикальне перенесення газів відбувається тільки за рахунок термогравітаційної конвекції, яка виникає у полі гравітації під дією різниці температур  $\Delta T$  газів та повітря. Тобто на шахтах витоку

газів ГПА завжди відбувається висхідний потік газів у повітрі, тому що  $T_z > T_{атм}$ . Для так званих холодних викидів (при умові  $T_z < T_{атм}$ ) може спостерігатися нисхідний потік, наприклад, від кондиціонерів повітря.

Різниця  $\Delta T$  між температурою газоповітряної суміші, що викидається,  $T_T$  і температурою навколишнього повітря  $T_a$  (300...470°K для досліджених ГТУ потужністю від 6 до 25 МВт), а також об'єм газів, що витікає з гирла джерела  $V_1$  (60...260 м<sup>3</sup>/с), зумовлюють за формулами (5.2) такі значення параметрів  $f$  (3...32) і  $v_m$  (6...13 м/с), що обчислення максимальної концентрації  $c_m$  (0,022-0,125 мг/м<sup>3</sup> для оксидів азоту) і відстані до неї (290...770 м) виконується за основними формулами методики ОНД-86 (табл. 5.1). Основні дані для табл. 5.1 отримані з каталогу [65]. Нормативна методика обчислення концентрацій від стаціонарних джерел викиду [63] передбачає витоки газу уздовж вертикальної осі джерела викиду, вона не враховує умови та конструктивні особливості шахти витоку газів ГПА. Її основна формула (5.1) визначення максимальної концентрації при наближенні значень швидкості до нуля  $w_0 \rightarrow 0$  та температури витоку газів до температури атмосферного повітря  $T_z \rightarrow T_{атм}$  обумовлює безкінечне зростання концентрації (до  $\infty$ ).

В роботі [161] наведено результати досліджень з чисельних, аналітичних та статистичних методів оцінки забруднення атмосферного повітря на базі моделі Гауса. Зазначена модель найбільш поширена для цілей оцінки місцевої якості повітря аеропортів, як це показано у керівництві ІКАО [150]. Вертикальна та бічна (за напрямком вітру) дисперсія шлейфу викидів визначається за розподілом Гауса, а також включає ефект відбиття шлейфу від поверхні землі.

Моделі дисперсії ЗР в атмосферному повітрі, що застосовуються в розрахунках місцевої якості повітря були оцінені в рамках діяльності Комітету з авіації та охорони довкілля (САЕР) Міжнародної організації цивільної авіації (ІКАО) з огляду на їх технічні можливості та надійність [162, 164]. Отже, в тестових дослідженнях взяли участь моделі ADMS-Airport 5.0 (Великобританія), AERMOD (США), LASPORT 2.3 (Німеччина), та PolEmitCa (НАУ, Україна) [162-164]. Наведені моделі застосовують різні методики, припущення та обмеження, наприклад, накладені національними нормативними правилами на оцінку забруднення повітря

від стаціонарних джерел викиду ЗР [63,152]. Зокрема вітчизняна модель PolEmitCa для оцінки якості повітря від викидів ЗР стаціонарними джерелами застосовує алгоритми методики ОНД-86 [63]. Тому можна очікувати відмінності в результатах обчислення дисперсії між моделями [160-164], незважаючи на використання однакового набору вхідних даних.

Таблиця 5.1 - Параметри витоку газів через шахти досліджених типів ГПА

Параметр	ГТК-750-6	ГПА-Ц6,3	ГТК-10И	ГПА-Ц16	ГТК-25И
Температура викиду, К	575	696	626	685	764
Об'єм газів викиду, м <sup>3</sup> /с	96,1	60,1	93,3	202	258
Об'єм газів викиду, кг/с	58,6	30,1	52,1	103	118
M <sub>NOx</sub> , г/с	3,3	2,6	5,5	7,3	12,6
H, м	25	9	21,5	13,5	16,5
D, м	2,83	2,92	1,9	3,91	3,0
S, м <sup>2</sup>	6,28	6,7	2,83	12,0	7,1
V, м/с	15,3	9,0	33	16,8	36,5
ΔH SCREEN, м	4.71	4.07	4.83	7.1	24.9
ΔH Берлянд, м	63.7 (36.6)	48.2 (31.8)	101.7 (62.6)	118.8 (77.7)	224.0 (155.6)
	0,5625	0,667	0,618	0,655	0,692
f	3.788	7.259	13.488	15.621	31.368
v <sub>m</sub> , м/с	6.65184	9.01633	7.32	11.68	12.61
C <sub>max</sub> , мг/м <sup>3</sup>	0.022777	0.125343	0.037019	0.08793	0.073
X <sub>max</sub> , м	648.34	291.72	678.77	549.2	772.4
Гауссова модель з H <sub>эф</sub> по Берлянду, C <sub>max</sub> , мг/м <sup>3</sup>	0.116523	0.267194	0.111479	0.147458	0.08 1788
X <sub>max</sub> , м	1157.8	650.68	1785.8	1961.63	4305.9
Гауссова модель з H <sub>эф</sub> по SCREEN, C <sub>max</sub> , мг/м <sup>3</sup>	0.842099	3.862387	1.819487	4.24387	4.940964
X <sub>max</sub> , м	274.77	93.26	234.34	170.4	218.1
Гауссова модель ΔH <sub>эф</sub> =0, C <sub>max</sub> , мг/м <sup>3</sup>	1.150842	7.586048	2.624556	9.167149	10.4
X <sub>max</sub> , м	218.94	57.08	179.5	97.3	126.7

Проведено верифікацію удосконаленої методики/моделі PolEmiCa [163, 164] обчислення локального забруднення атмосферного повітря в аеропортах і їх околиці на відповідність вимогам керівництв ICAO [150]. За рішенням Координаційного засідання CAEP SG-2020 «детальна документація для української моделі якості повітря PolEmiCa, надана в CAEP/12-FESG-MDG/2-WP/09 [164], повинна розглядатися як остаточна документація для верифікації цієї моделі на відповідність вимогам ICAO документу [150]».

Але методика ОНД-86 [63] не враховує усіх можливих особливостей стаціонарних джерел викиду, зокрема в частині холодних викидів (застосовується формула (5.4) для оцінки максимальної концентрації) і пасивних (застосовується формула (5.5) для оцінки концентрації) стаціонарних джерел. Тому удосконалення моделей оцінки забруднення повітря викидами стаціонарних джерел компресорних станцій (та аеропортів) є актуальним завданням.

На основі роботи [161] були сформовані вихідні умови для цілей тестових порівняльних досліджень моделі PolEmiCa, що розроблена в Україні [163], яка в частині обчислення стаціонарних джерел застосовує алгоритми нормативної методики ОНД-86 [63]. Сценарій тесту побудований на результатах експериментальних досліджень в аеродинамічній трубі процесів викиду від точкового джерела та забруднення повітря в межах шлейфу від нього [165]: розглядається пасивне точкове джерело на висоті 60 м над землею поверхнею в точці  $x = 0$  м,  $y = 0$  м; масова швидкість викиду  $Q = 1$  г/с  $\text{NO}_x$ , без хімічного перетворення і без осадження ЗР; швидкість вітру на висоті джерела викиду суміші з джерела  $u_g = 10$  м/с; довжина Обухова - *нескінченність* (тобто умови *нейтральної* стратифікації атмосфери); довжина шорсткості поверхні  $z_0 = 0,7$  м, висота переміщення (для визначення профілю швидкості вітру) відсутня; оцінюється стаціонарний розподіл концентрації на земній поверхні. На рис. 5.2 (відповідає рис. 1 в роботі [165]) показані результати експерименту (квадратами) і червоною лінією наведений обчислений результат за спрощеною моделлю оцінки концентрації для викиду легкої домішки ЗР від стаціонарного точкового джерела [152] для поперечно інтегрованої концентрації на земній поверхні  $z=0$  м.

У випадку, коли профіль швидкості вітру визначається ступеневим законом та коефіцієнт вертикальної дифузії є лінійною функцією від висоти:

$$u(z)=u_H(z/H)^n; K(z) = K' z.$$

Аналітичне рішення рівняння атмосферної дифузії для поперечно інтегрованої концентрації:

$$c_y(x) = \frac{Q}{x(1+n)K'} \exp\left(-\frac{Hu_H}{x(1+n)^2 K'}\right). \quad (5.6)$$

Максимум поперечно інтегрованої концентрації  $C_y$  розташовується в координаті:

$$x = (Hu_H) / (x(1+n)^2 K'), \quad (5.7)$$

а саме максимальне значення концентрації дорівнює:

$$c_{y,max} = (1+n)e^{-1} \frac{Q}{Hu_H}, \quad (5.8)$$

де у формулах (5.6–5.8) для обчислення концентрацій використані значення показника ступеня  $n=0,27$ , швидкості вітру на висоті викиду  $u_H=10,0$  м/с та коефіцієнту обміну  $K'=0,36$  м/с. Результати обчислення концентрацій за формулами (5.6–5.8) наведені на рис. 5.2 червоною лінією.

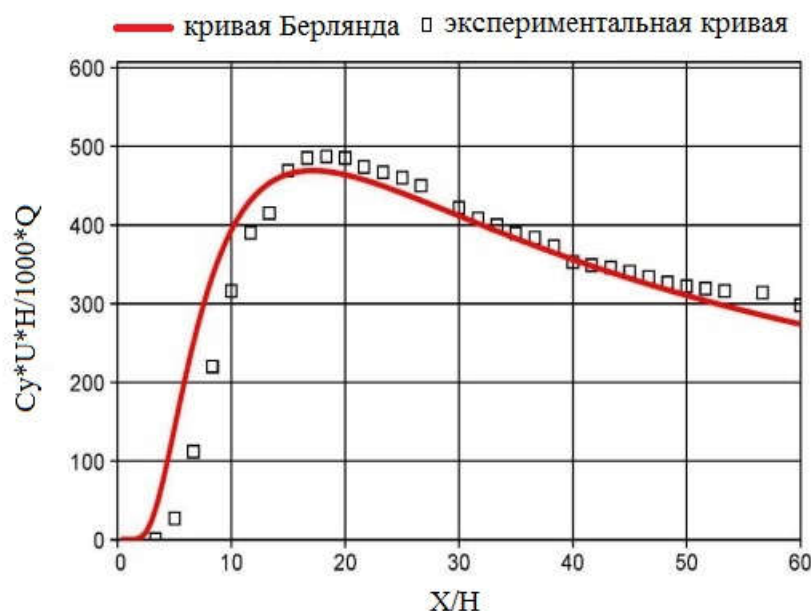


Рисунок 5.2 - Масштабовані, поперечно інтегровані значення концентрації на рівні землі ( $z_0=0$ ): результати експериментів з аеродинамічної труби (квадрати) з роботи [165]; червона лінія обчислена за формулами спрощеного аналітичного рішення

## 5.2. Аналіз аналітичних та чисельних рішень моделі Гауса

Модель Гауссового безперервного спливаючого шлейфу домішки забруднюючих речовин (ЗР) покладена в основу більшості моделей, верифікованих ІСАО/САЕР на відповідність вимогам та рекомендаціям керівництва ІСАО 9889 [150]. Вертикальна та бічна дисперсія шлейфу викидів визначається за розподілом Гауса, а також включає ефект відбиття шлейфу від поверхні землі. Проаналізовано аналітичні та чисельні рішення моделі Гауса для оцінки дисперсії забруднюючих речовин від стаціонарних висотних джерел.

Спрощена формула розподілу концентрацій  $c(x, y, z)$  Гауссового шлейфу, яка забезпечує опис шлейфу від стаціонарного джерела, як висотного, так і розташованого на поверхні землі, рекомендована до застосування в [162]:

$$c(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\bar{u}\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}. \quad (5.9)$$

і між параметрами Гауссового шлейфу  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  та коефіцієнтами турбулентного обміну (турбулентної дифузії) в атмосферному повітрі застосовуються звичайні зв'язки:

$$\sigma_y(x) = \sqrt{2K_y x / \bar{u}}, \quad \sigma_z(x) = \sqrt{2K_z x / \bar{u}}, \quad (5.10)$$

де  $Q$  – значення величини викиду домішки ЗР у повітря від джерела,  $H$  – висота джерела викиду,  $\bar{u}$  – усереднена швидкість вітру і  $K_y$  та  $K_z$  – деякі належним чином визначені горизонтальний та вертикальний коефіцієнти турбулентної атмосферної дифузії.

Максимум концентрації (5.9) утворюється уздовж осі ОХ ( $y=0$ ) на рівні поверхні землі ( $z=0$ ) і обчислюється за формулою:

$$C_x = \frac{Q}{2\pi\bar{u}\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right] = \frac{Q}{2\pi x \sqrt{K_y K_z}} \exp\left[-\frac{H^2 \bar{u}}{4 \cdot K_z x}\right]. \quad (5.11)$$

Якщо в (5.11) прийняти за константи:

$$a = H^2 \bar{u} / 4K_z, \quad b = Q/2\pi(K_y K_z)^{1/2}$$

тоді максимум для поперечно інтегрованої концентрації  $C_y$  буде знаходитись в точці, яка є рішенням рівняння, що описує першу похідну функції  $b \exp(-a/x)/x$ , що прирівняна до нуля. Рішенням цього рівняння є:  $x=a$ , тобто

$$x_{\max} = H^2 \bar{u} / 4K_z,$$

$$C_{x_{\max}} = \frac{Q}{2\pi x_{\max} \sqrt{K_y K_z}} \exp\left[-\frac{H^2 \bar{u}}{4 \cdot K_z x_{\max}}\right] = \frac{2Q}{\pi H^2 \bar{u}} \sqrt{\frac{K_z}{K_y}} = \frac{2Q}{\pi H^2 \bar{u}} \frac{\sigma_z}{\sigma_y}. \quad (5.12)$$

Результати обчислення максимальної концентрації та її координати за формулами (5.12) для параметрів тестового сценарію зведені в табл. 5.2 для варіантів: 1) швидкість вітру на висоті джерела викиду 60 м є однаковою уздовж висоти і дорівнює 10м/с; 2) швидкість вітру на висоті 60 м дорівнює 10 м/с, усереднене значення уздовж висоти відповідно до ступеневого закону та показника ступеню 0,27 дорівнює 2.42 м/с.

Таблиця 5.2 - Результати обчислення максимальної концентрації та її координати

Варіанти обчислення	u, м/с	K, м <sup>2</sup> /с	X <sub>макс</sub> , м	X <sub>макс</sub> /H	C <sub>xмакс</sub> ,МГ/м <sup>3</sup>	C <sub>умакс</sub> ,МГ/м <sup>3</sup>	C <sub>умакс</sub> Hu/Q
1	10	1,9	4736,8	78,95	0,00932		
2	2,42	1,9	1146,3	19,1	0,03851		
3	1,903	3,6	1033,34	17,22		0,779	467,4
4	1,903	3,6	1033,34	17,22		4,24	2543,4
5			998,88/1490.0	16,65/24.8	0,044	3.22	1933.0
6	0,8	0,06	1498.25	24.97		2.537	1522.35
7	10	0,36	3121.35	52.02		0.203	121.79
8	2,42	0,36	593.92 м,	9.90		1.067	640.06

Застосування значення  $\bar{u}=10$  м/с зумовлює занадто велику дистанцію до точки утворення максимуму  $x_{\max}$  і вчетверо більше значення самої максимальної концентрації  $C_{x_{\max}}$ .

Рішенням для поперечно інтегрованої концентрації уздовж усередненої вісі шлейфа, яка не залежить від горизонтальної ширини розподілу концентрації на поверхні землі:

$$c_y(x) = \int_{-\infty}^{\infty} c(x, y, 0) dy, \quad (5.13)$$

є наступна формула (5.14) для максимального значення поперечно інтегрованої концентрації з роботи [20]:

$$C_{y_{max}} = \sqrt{\frac{2Q}{\pi e H}} \quad (5.14)$$

що утворюється в координаті:

$$x_{max} = \frac{H^2 u}{2K_z} \quad (5.15)$$

Для моделі Гауссового стаціонарного шлейфу (5.9) і для максимуму поперечно інтегрованої концентрації (5.14) після підстановки запропонованих в тестовому сценарії значень викиду та висоти джерела, отримаємо результати *варіанту обчислення 3* в табл. 5.2 для усередненого значення швидкості вітру і коефіцієнту дифузії уздовж висоти джерела  $H$  викиду для показника ступеня  $n=0,27$  в ступеневій формулі профілю вітру, як це запропоновано в роботі [152]. Координата точки максимуму поперечно інтегрованої концентрації  $C_{y_{max}}$  за формулою (5.14) розташовується дещо ближче до джерела викиду (на  $\sim 10\%$ ) ніж максимальна концентрація  $C_{x_{max}}$  за формулою (5.12).

Далі використовується також безрозмірне масштабоване значення поперечно інтегрованої концентрації  $C_y$  для оцінки її розподілу у стаціонарному шлейфі [164]:

$$c_y(x) = c_y(x) \frac{HU}{Q}, \quad (5.16)$$

та безрозмірна координата утворення максимуму концентрації  $x/H$ , де швидкість в процедурі масштабування  $U$  встановлюється як швидкість вітру на висоті джерела  $H$ .

Для усередненої швидкості вітру уздовж висоти джерела викиду 10 м поперечно інтегрована концентрація обчислюється величиною  $C_{y_{max}} = 4,24$  мг/м<sup>3</sup> ( $C_{y_{max}}UH/Q = 2543,4$ , варіант обчислення 4 в табл. 5.2), що в  $\sim 5$  разів перевищує результати в роботі [164] і результати отримані при вимірюваннях в аеродинамічній трубці та наведені на рис. 5.2.

На рис. 5.3 наведені для порівняння результати тестових іспитів для провідних моделей оцінки якості повітря в аеропортах уздовж вісі факелу, що утворюється в напрямку вітру, а на рис. 5.4 – порівняння обчисленого поля концентрації за цими моделями [165].



З рис. 5.3 можна побачити, що алгоритми методики ОНД-86 [63], які застосовуються в моделі PolEмиCa для стаціонарних джерел обумовлюють в 2-3 рази менші значення максимальної концентрації на осі факела для найбільш простого виду джерела – стаціонарного (або безперервного) й пасивного (або нейтрального, тобто шлейфу, який не є ні легшим, ні важчим за повітря) і без вступу в реакцію перетворення досліджуваної ЗР в шлейфі. А з рис. 5.4 очевидно, що поле концентрації (час усереднення 20 хв.) за методикою [63] є вужчим, ніж за результатами обчислення Гауссових моделей (час усереднення 1 год.).

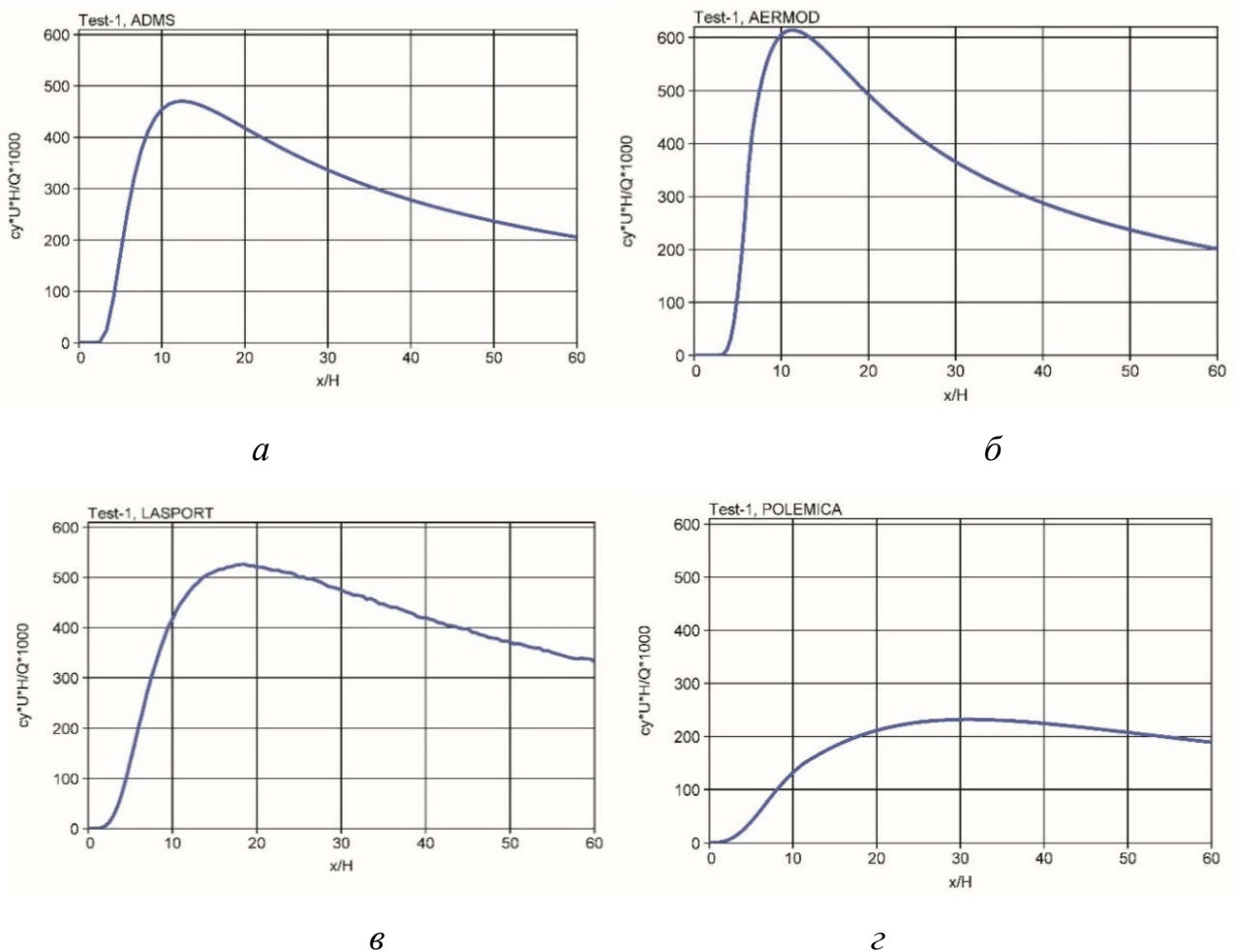


Рисунок 5.3 - Порівняння результатів обчислення максимальних інтегрованих концентрацій уздовж вісі факела для тестового сценарію [63, 165] провідними моделями оцінки якості повітря: *а* – модель ADMS; *б* – модель LASPORT, *в* – модель AERMOD, *г* – модель PolEмиCa

Саме період усереднення концентрації може бути однією з основних причин такої відмінності в результатах. Тому актуальною є задача дослідження базової моделі оцінки концентрації ЗР в атмосферному повітрі в результаті викиду від стаціонарного джерела [141, 151-154] з метою визначення основних причин відмінностей результатів обчислення за основними моделями, що визнані міжнародною спільнотою.

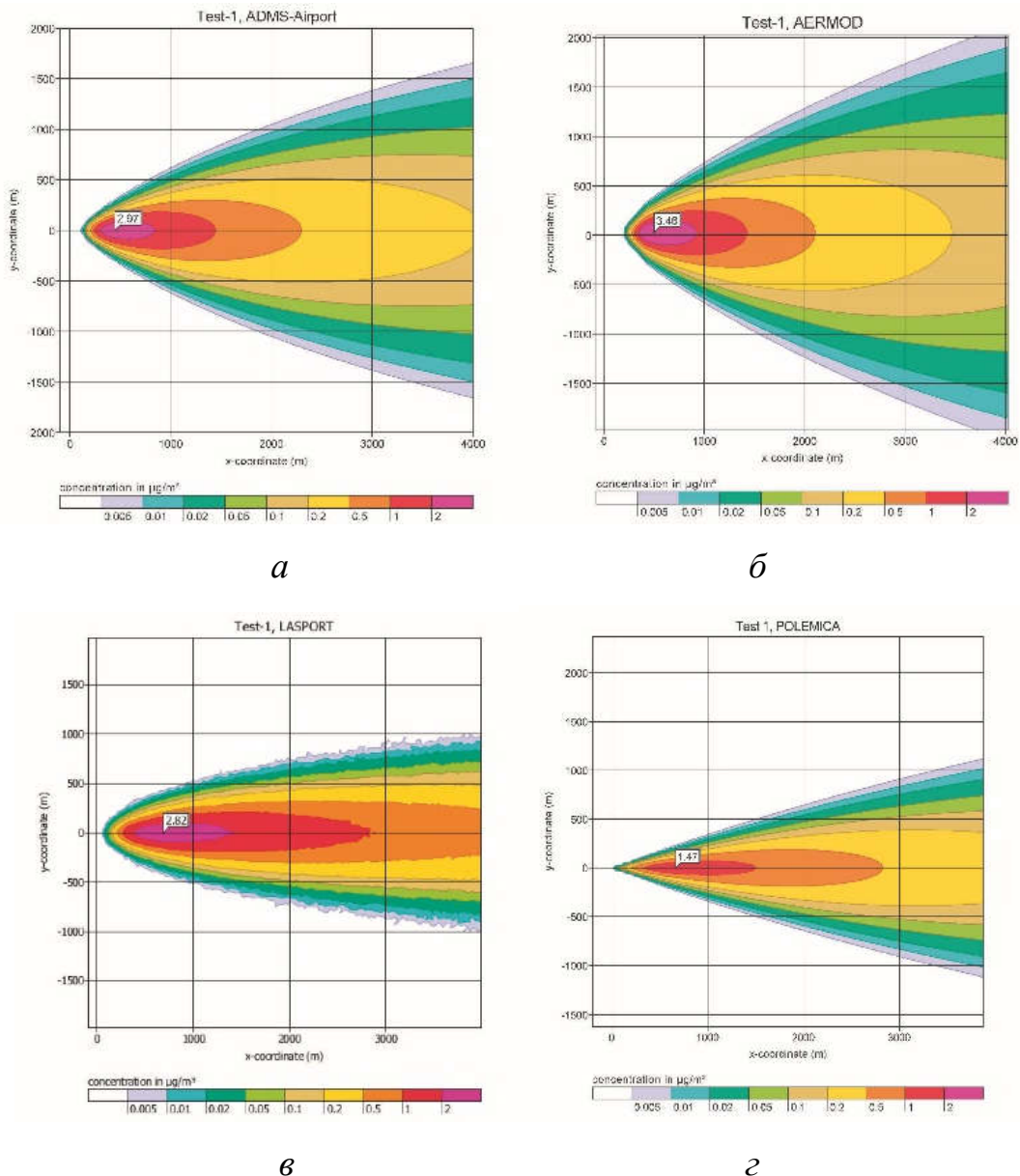


Рисунок 5.4 - Порівняння результатів обчислення провідними моделями оцінки якості повітря в аеропортах поля концентрацій від стаціонарного пасивного джерела уздовж вісі факелу для тестового сценарію [165]: а – модель ADMS; б – модель LASPORT, в – модель AERMOD, г – модель PolEmiCa

### 5.3. Аналіз вихідних моделей нормативного документу ОНД-86

Максимум поперечно інтегрованої концентрації  $C_{y, \max}$  (5.8) та його координата  $x_{C_{y, \max}}$  (5.7) є спрощенням залежності наземної концентрації (якщо покласти висоту  $z_1$  рівною одиниці довжини), отриманої як рішення М.Берлянда для викиду легкої домішки ЗР від стаціонарного точкового джерела в роботі [151]:

$$q(x, y, 0) = \frac{M}{2(1+n)k_1 \sqrt{\pi k_0} x^{3/2}} e^{-\frac{u_1 H^{1+n}}{(1+n)^2 k_1 x} - \frac{y^2}{4k_0 x}} \quad (5.17)$$

де швидкість вітру  $u_1$  та коефіцієнти турбулентної дифузії  $k_1$  і  $k_0$  відповідають висоті  $z_1 = 1$  м, а значення  $M = Q$  та  $n = 0,27$ , як запропоновано в роботі [164]. Результати їх обчислення метеорологічним препроцесором *PreMeteo* програми *PolEmitCa*:  $u_1 = 0,8$  м/с;  $k_1 = 0,06$  м/с;  $k_0 = 0,36$  м/с.

Величини максимуму концентрації  $q$  для залежності (5.17)  $q_m$  і  $x_m$  знаходяться

з умови  $\frac{dq}{dx} = \frac{dq}{dy} = 0$ :

$$q_m = \frac{0,116(1+n)^2 M}{u_1 H^{1,5(1+n)}} \sqrt{\frac{k_1}{k_0 u_1}} \quad (5.18)$$

$$x_m = \frac{2}{3} \frac{u_1 H^{1+n}}{k_1 (1+n)^2} \quad (5.19)$$

Їх чисельні значення занесені у рядок *варіанту обчислення 5* в табл.5.2. Чисельне рішення для поперечно інтегрованої концентрації  $C_y$  для рішення (5.17) з роботи [151, 152] для легкої домішки в атмосферному повітрі, що викидається точковим джерелом на висоті  $H=60$  м, наведене на рис. 5.5. Відмінність у результатах обчислення поперечно інтегрованих значень концентрації  $C_y$  від наведених на рис. 5.2 можна пояснити використанням значень для швидкості вітру  $u_1$  та коефіцієнтів турбулентної дифузії  $k_1$  і  $k_0$  на висоті  $z_1=1$  м у формулі (5.17) та на висоті  $H=60$  м у формулах (5.7, 5.8) (що дорівнюють формулам (8, 9) з роботи [164]). В тому числі й положення максимуму за формулою (19)  $x_{\max}/H = 16,65$  відрізняється від обчисленого значення  $24,8$  ( $x_{C_{y, \max}} = 1490,0$  м) для максимуму поперечно інтегрованих значень  $C_{y, \max} = 0,00322$  г/м<sup>3</sup> (масштабоване безрозмірне значення  $c_{YUNQ} = 1933,0$ , див. на рис. 5.5). Максимальна концентрація  $C_{x, \max} = 0,044$  мг/м<sup>3</sup>

незначно відрізняється від максимуму за *варіантом обчислення 2*, а максимум  $C_{y,max}$  від аналогічного за *варіантом обчислення 4* (3,2 мг/м<sup>3</sup> проти 4,2 мг/м<sup>3</sup>), що, в принципі, добре пояснюється обранням усереднених значень для метеопараметрів (на висоті 1м та на висоті 60м відповідно). При масштабуванні швидкість вітру приймалась 10 м/с як і в роботі [164].

Від осі  $x$  в поперечному напрямку (уздовж осі  $y$ ) концентрація убуває симетрично за експонентним законом, причому з ростом  $x$  це спадання сповільнюється. Основна частина домішки ЗР в атмосферному повітрі, таким чином, зосереджена в порівняно вузькому факелі газів від викиду джерела, вісь якого направлена уздовж осі  $x$  ( $y = 0$ ). З виконаних розрахунків для максимуму концентрації і її координати наближено слідує [151]:

$$\begin{aligned} q_m &= C_1 \frac{M}{u_1} \sqrt{\frac{k_1}{u_1 k_0}} \frac{1}{H^{\beta_1}}, \\ x_m &= C_2 \frac{u_1}{k_1} H^{1+\beta_2}, \end{aligned} \quad (5.20)$$

де  $C_i, \beta_i$  ( $i=1, 2$ ) — постійні, які, як показали дослідження, порівняно мало залежать від  $H$  і  $z_0$ . При  $H=100$  м і  $z_0=0,01$  м значення  $\beta_1=1,9$  і  $\beta_2=0,2$ , а  $C_1=0,15$  і  $C_2=0,5$  [151]. Значення цих величин є близькими до значень відповідних величин в (18) і (19) при  $n=0,15-0,2$ .

Ступенева функція, що описує профіль швидкості вітру з таким значенням показника ступеня, є близькою до логарифмічної залежності для профіля швидкості вітру (при  $z_0=0,01$  м), показник ступеня при  $H$  в (5.18) в такому разі дорівнює 1,7-1,8. Для визначення наземної концентрації  $q$  при інших значеннях координати  $x$ , не рівних  $x_m$ , можна використовувати співвідношення між  $q/q_m$  і  $x/x_m$ :

$$\frac{q_y = 0}{q_m} = f\left(\frac{x}{x_m}\right) e^{2/3\left(1-\frac{x_m}{x}\right)} \left(\frac{x_m}{x}\right)^{3/2}, \quad (5.21)$$

Таким чином, аналітичні рішення (5.18–5.21) можна покласти в основу моделі обчислення миттєвих концентрацій ЗР в атмосферному повітрі, що утворюються в результаті викиду стаціонарним джерелом за відсутності даних про температуру та обсяги викиду.

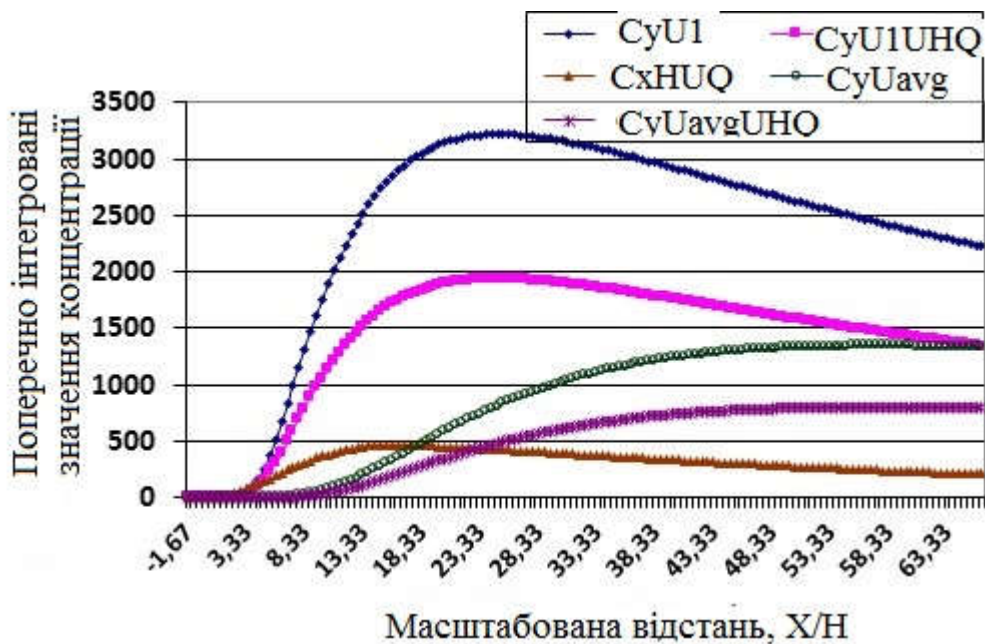


Рисунок 5.5 - Поперечно інтегровані значення концентрації на рівні землі ( $z_0=0$ ) та їх масштабовані значення для аналітичного рішення [151], визначені обчислювальним методом ( $C_y$  подано у розмірності  $\text{г/м}^3$  величиною збільшеною в  $10^6$  разів): *a* – для швидкості на рівні 1 м – синій ромб; *b* – для усередненої швидкості уздовж висоти джерела викиду – синє коло; *v* – масштабоване аналітичне рішення (5.8) – коричневий трикутник; *z* – масштабоване обчислене рішення (5.17) для швидкості на рівні 1 м – рожевий квадрат; *d* – масштабоване обчислене рішення (5.12) для усередненої швидкості уздовж висоти джерела викиду – фіолетовий хрест

### 5.3.1. Ефект осереднення концентрації

Тим не менше має істотне значення питання про вплив тривалості часу спостереження, до якого відносяться концентрації, отримані в результаті рішення рівняння дифузії. Цей вплив пов'язаний з необхідністю вивчення залежності між обчисленими і вимірними концентраціями. При визначенні ж вмісту домішки ЗР у повітрі експериментальним шляхом значення концентрацій залежать від часу забору проби. Результати впливу забруднення атмосфери на навколишнє середовище (на живі організми, рослинність, різні покриття і т.д.) визначаються не тільки концентраціями домішок ЗР, але й тривалістю (тобто експозицією) впливу [121]. Залежно від властивостей домішок і тривалості їх дії встановлюються відповідні

гранично допустимі концентрації (ГДК), зокрема максимально-разова ГДК встановлюється для інтервалу часу 20 хв.

Зокрема, для легкої домішки ( $w = 0$ ), коли коефіцієнт обміну  $k_z$  зростає лінійно з висотою, а швидкість вітру  $u$  змінюється за ступеневим законом, використовуючи рішення (5.17), в [152] отримано формулу для обчислення концентрації з урахуванням тривалості часу спостереження:

$$\bar{q} = \frac{M}{(1+n) k_1 \varphi_0 x^2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u_1 H^{1+n}}{k_1 (1+n)^2 x} - \frac{y^2}{2 \varphi_0^2 x^2}}. \quad (5.22)$$

Слід звернути увагу на те, що в цій формулі коефіцієнт  $k_0$  у порівнянні з (5.17) виявився виключеним і замість нього введено величину  $\varphi_0$  – дисперсію напрямку вітру за період часу спостереження (визначення концентрації)  $T$ .

Відповідно змінюється вираз для максимуму концентрації  $q_m$  і відстані  $x_m$ , на якій він досягається

$$\bar{q}_m = \frac{0,216 k_1 (1+n)^3 M}{\varphi_0 u_1^2 H^2 (1+n)}; \quad \bar{x}_m = \frac{u_1 H^{1+n}}{2 k_1 (1+n)^2}. \quad (5.23)$$

Вирази (5.23) схожі з формулами (5.18) і (5.19) для концентрації  $q_m$  і відстані  $x_m$ . Однак з урахуванням ефекту часу спостереження – усереднення концентрації – зменшуються значення максимальної концентрації і відстані, де вона досягається, а ступінь залежності максимальної концентрації від  $H$  виявляється значно вищою.

Потрібно обчислити поперечно інтегровану концентрацію  $C_y$  для виразу 20-30 хвилинної концентрації (5.22), подібно як для миттєвої концентрації (5.17). Поперечно інтегровану концентрацію  $C_y$  слід розглядати у вигляді формули (5.13) і подібно до неї значення концентрації  $C_y$  залежить від рішення інтегралу виду

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{y^2}{2 \cdot \varphi_0^2 \cdot x^2}\right] dy = \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{y^2}{a}\right) dy,$$

де  $a = 2x^2\varphi_0^2$ .

Тоді максимум поперечно інтегрованої концентрації  $C_{у\max}$  буде знаходитись в координаті:

$$x_{\max} = \frac{H^{1+n} u_1}{(1+n)^2 K_1}, \quad (5.24)$$

що подібна до формули (5.14), але не дорівнює їй, а максимальне значення поперечно інтегрованої концентрації для Гауссового шлейфу (5.12) після підстановки рішення для координати  $x_{\max}$  буде

$$C_{y_{\max}} = \frac{Q(1+n)}{eu_1 \cdot H^{1+n}}, \quad (5.25)$$

У порівнянні з максимумом для миттєвої поперечно інтегрованої концентрації (5.14, 5.15) і рішення для усередненої (20-хвилинної) концентрації (5.24, 5.25) зумовлює нижче значення максимуму, розташоване на більшій відстані від джерела викиду – *варіант обчислення 6* (для поточних значень метеопараметрів  $u_1 = 0,8$  м/с;  $k_1 = 0,06$  м/с;  $n=0,27$ ) в табл. 5.2. Підстановка у рішення для усередненої концентрації (5.24, 5.25) даних як в роботі [165] ( $u_H = 10$  м/с;  $k_0 = 0,36$  м/с;  $n=0,27$  – *варіант обчислення 7* в табл. 5.2) і усереднених даних уздовж висоти джерела викиду ( $u_H = 1,907$  м/с;  $k_0 = 0,36$  м/с;  $n=0,27$ ) – *варіант обчислення 8* в табл. 5.2 наближує результати обчислення до спрощеної моделі за формулами (5.6-5.8) – *варіант обчислення 3* в табл. 5.2. Тобто для вхідних даних з роботи [164] отримуємо нижче значення для максимуму  $C_{y_{\max}}$ , яке розташоване ближче до джерела викиду  $x_{\max}$ , і які більш подібні до значень, обчислених за формулами для максимуму поперечно інтегрованої концентрації (5.8)  $C_{y_{\max}} = 0,779$  мг/м<sup>3</sup> та його координати (5.7)  $x_{\max} = 1033,34$  м для моделі Гауссового шлейфа, або в безрозмірних (масштабованих) значеннях  $C_{y_{\max}} u_H / Q = 467,4$ ;  $x_{\max} / H = 17,22$ .

### 5.2.2. Дослідження розрахункових залежностей методики ОНД-86

За умов небезпечної швидкості вітру  $u_m$  приземна концентрація шкідливих речовин  $c$  (мг/м<sup>3</sup>) в атмосфері уздовж вісі факела викиду на різних відстанях  $x$  від джерела викиду визначається за формулою:

$$c = s_1 \cdot C_m, \quad (5.26)$$

де  $C_m$  визначається за формулами (5.1-5.5), а безрозмірний коефіцієнт  $s_1$ , який визначається в залежності від відношення  $x/x_m$  і коефіцієнта  $F$  за формулами

методики [63] в залежності від  $x/x_m$  і  $F$ .

Значення приземної концентрації шкідливих речовин в атмосфері  $c_y$  (мг/м<sup>3</sup>) на відстані  $y$  (м) по перпендикуляру до вісі факела викиду визначається за формулою  $c = s_2 c$ , де  $s_2$  – безрозмірний коефіцієнт, який визначається в залежності від швидкості вітру  $u$  (м/с) і відношення  $y/x$  по значенню аргументу  $t_y$  також за формулами методики [63].

Максимум поперечно інтегрованої концентрації (аналогічно підходу в роботі [164]) можна визначити за формулою (5.13) для залежності виду  $c(x, y, 0) = s_1 \cdot s_2 \cdot c_m$ . Зважаючи на отримані результати в табл. 5.2 для всіх варіантів обчислення, можна зробити припущення, що її максимум розташовується на відрізку, що визначається формулою методики [63]:

$$s_1 = \frac{1,13}{0,13 \left( \frac{x}{x_m} \right)^2 + 1} \text{ при } 1 < \frac{x}{x_m} \leq 8.$$

Функцію  $s_1$  можна представити як  $a/(bx^2+1)$ , її похідна дорівнює  $-2abx/(bx^2+1)^2$  і тільки при  $x=0$  ця похідна дорівнює 0, що не відповідає умовам даного тестового дослідження.

Якщо інтеграл (13) розглянути для  $c = s_1 \cdot s_2 \cdot c_m$ , тобто

$$c_y = \int_{-\infty}^{\infty} c_{max} s_1 s_2 dy = \int_{-\infty}^{\infty} c_{max} \frac{1,13}{0,13 / x_{max}^2 x^2 + 1} s_2 dy,$$

де  $s_2$  визначається за методикою [63], тоді такий інтеграл аналітичного рішення не має.

При проектуванні промислових підприємств важливо визначити найбільшу можливу величину концентрації домішки, бо в цілях задоволення гігієнічних вимог саме вона не повинна перевищувати допустимого значення. Для знаходження такої величини використовується формула (5.27) для  $q_m$ ,

$$\bar{q}_m = C_3 \frac{MK}{u_1} \frac{1}{H^{2,3}}, \quad \bar{x}_m = C_4 \frac{u_1}{k_1} H^{1,3}, \quad (5.27)$$

що є чисельним аналогом формули (5.20) і в якій за висоту джерела приймається значення  $H_e = H + \Delta H$ , де  $H$  – висота труби,  $\Delta H$  – визначається згідно із



запропонованою в роботі Берлянда і ін. (1964а) наближеною формулою для визначення початкового підйому (5.28):

$$\Delta H = \frac{1,5w_0R_0}{u} \left( 2,5 + \frac{3,3gR_0\Delta T}{T_a u^2} \right), \quad (5.28)$$

де  $u$  - швидкість вітру на висоті флюгера (10 м),  $R_0$ - радіус гирла труби (джерела викиду),  $w_0$  і  $\Delta T$  - швидкість і перегрів над температурою повітря вихідних газів,  $T_a$  - температура навколишнього повітря за абсолютною шкалою. Аналіз показує, що саме ця формула конвективного підйому струменя покладена в формулу розрахунку максимальної концентрації (5.1) – основної формули нормативної методики [63].

При цьому мається на увазі, що  $q_m$  істотно залежить від метеорологічних умов відповідно до параметрів, що містяться в (5.27). Особливе значення має залежність  $q_m$  від швидкості вітру  $u$ . З одного боку, при фіксованій висоті джерела величина  $q_m$  зростає зі зменшенням  $u$ ; з іншого боку, зі зменшенням  $u$  зростає  $\Delta H$ . Крім того, від  $u$  залежить і  $K$  в (5.27). Тому існує деяка «небезпечна» швидкість вітру  $u_m$ , при якій досягається найбільше значення концентрації. Величина цієї концентрації знаходиться з умови:

$$\frac{\partial \bar{q}_m}{\partial u} = 0.$$

З розглянутих залежностей  $\varphi_0$  від  $u_1$  і  $\Delta T$  випливає, що при нестійкій стратифікації величина  $\varphi_0$  при фіксованому  $\Delta T$  убуває зі збільшенням  $u_1$ , а при заданому  $u_1$  дещо зростає з ростом  $\Delta T$ . В результаті можна встановити, що при порівняно великих  $\Delta T$ , коли  $K$ , а отже, і концентрація домішки досягають максимальних значень, залежність  $K$  від  $u_1$  наближено інтерполюється функцією

$$K = K_{u=u_{10}} \left( \frac{u_{10}}{u_1} \right)^{n_1}, \quad n_1 = \frac{1}{2 \left[ 1 + \left( \frac{2u_1}{u_{10}} \right)^2 \right]}, \quad (5.29)$$

де  $u_{10} = 2$  м/с.

На підставі (5.27 – 5.29) встановлюється значення небезпечної швидкості вітру при несприятливих умовах стратифікації атмосфери і відповідна цим умовам величина найбільшої концентрації. Зручно при цьому ввести параметри (як у формулах (5.2)):

$$v_m = 0,65 \sqrt[3]{\frac{v_1 \Delta T}{H}}, \quad f = 10^3 \frac{\omega_0^2 D}{H^2 \Delta T},$$

де  $v_1 = \pi R_0^2 \omega_0$  — об'єм викидів,  $D = 2R_0$  — діаметр труби джерела викиду. У зв'язку з цим доцільно охарактеризувати можливий діапазон їх зміни для джерел, що реально зустрічаються. Для досить потужних джерел нагрітих викидів (ТЕС, ТЕЦ, агломераційні фабрики, цементні заводи та ін.)  $\Delta H = 50-250$  м,  $\Delta T = 50-200^\circ\text{C}$ ,  $v_1 = 50-1200$  м<sup>3</sup>/с. З огляду на взаємозалежність цих параметрів, їх значення відносно великі і змінюються в межах 2-7 м/с для  $v_m$ , а величина  $f$ , як правило, становить 0,5-2 м/(с<sup>2</sup>·°C), а іноді досягає 5-6 м/(с<sup>2</sup>·°C). Для слабо нагрітих викидів, а також в разі малої потужності джерел, наприклад для більшості вентиляційних викидів, при  $H = 20-50$  м,  $\Delta T = 5-10^\circ\text{C}$ ,  $v_1 = 1-10$  м<sup>3</sup>/с значення  $v_m$  зазвичай змінюються в межах 0,5—1 м/с, а  $f$  перевищує 10 м/(с<sup>2</sup>·°C). Наприклад, для ГПА з авіаційного типу ТКУ характерними є значення  $\Delta T = 200-300^\circ\text{C}$ ,  $v_1 = 50-120$  м<sup>3</sup>/с,  $H = 15-25$  м, тому слід очікувати  $v_m = 5-7$  м/с та  $f > 100$  м/(с<sup>2</sup>·°C).

Між величинами  $v_m$  і  $f$  існує певна кореляція. Великим  $f$ , як правило, відповідають малі  $v_m$ , а малим  $f$  — великі  $v_m$ . Наближено можна прийняти

$$\begin{aligned} u_m &= v_m \text{ при } v_m < 2 \text{ м/с,} \\ u_m &= v_m (1 + 0,12 \sqrt{f}) \text{ при } v_m > 2 \text{ м/с.} \end{aligned} \quad (5.30)$$

При отриманих значеннях вираз для максимальної концентрації  $q_m$  відповідно до (27) і (30) можна записати в наступному вигляді:

$$q_m = C_3' K \Big|_{u_1 = u_{10}} \frac{Mm}{H^2 \sqrt[3]{v_1 \Delta T}} E_1(v_m, f), \quad (5.31)$$

де

$$\begin{aligned} E_1(v_m, f) &= \frac{(u_{10}/u_{1m})^{n_1} (u_{1m}/u_{10})}{G_2(f) \left[ 1 + 0,2 \frac{v_m \sqrt[3]{f}}{u_{1m}} + 0,05 \left( \frac{v_m}{u_{1m}} \right)^3 \right]^{2,3}}, \\ C_3' &= C_3 \frac{1,54 \ln \frac{z_\phi}{z_0} G_2(f_0)}{\ln z_1/z_0}, \quad m = \frac{G_2(f)}{G_2(f_0)}, \end{aligned}$$

$f_0 = 0,42$  м/(с<sup>2</sup>·°C), що відповідає комбінаціям параметрів викиду, які часто зустрічаються на великих промислових і енергетичних об'єктах  $H$ ,  $\omega_0$ ,  $D$  и  $\Delta T$

(наприклад,  $H=120$  м,  $D=6$  м,  $W_0=10$  м/с,  $\Delta T=100^\circ$ ). В залежності від  $f$  параметр  $G_2$  приймає наступне значення:

$f$ м/(с <sup>2</sup> ·°С) . . .	0	0,42	1	5	10	50	100	1000
$G_2(f)$ . . . . .	0,70	0,47	0,41	0,35	0,27	0,18	0,14	0,07

Як показують розрахунки, при  $v_m > 2$  м/с, значення  $E_1 \sim 1$ .

Відстань  $x_m$ , на якій досягається значення  $q_m$ , відповідно з (5.27) і (5.31) знаходиться за формулою

$$x_m = C_4 \left( \frac{u_{1M}}{u_{10}} \right)^{n_1} \left( \frac{u_{1M}}{u_{10}} \right) H^{1,2} E_2, \quad (5.32)$$

де

$$C_4 = 10C_3, \quad E_2 = \left[ 1 + \frac{0,2v_m \sqrt[3]{f}}{u_{1M}} + 0,05 \left( \frac{v_m}{u_{1M}} \right)^3 \right]^{1,2} \sqrt{u_{1M}}$$

$$\frac{u_1}{k_1} = \frac{u_1}{k_1} \Big|_{u_1=u_{10}} \left( \frac{u_1}{u_{10}} \right)^{n_1} \left( \frac{u}{u_{10}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$q_{mu} = q_m E_3, \quad x_{mu} = x_m E_4, \quad (5.33)$$

$$E_3 = \frac{\left( \frac{u_{10}}{u_1} \right)^{n_1} \left( \frac{u_1}{u_{10}} \right) u_{1M}}{\left( \frac{u_{10}}{u_{1M}} \right)^{n_1} \left( \frac{u_{1M}}{u_{10}} \right) u_1} \left[ \frac{1 + 0,2 \frac{v_m}{u_{1M}} \sqrt[3]{f} + 0,05 \left( \frac{v_m}{u_{1M}} \right)^3}{1 + 0,2 \frac{v_m}{u_1} \sqrt[3]{f} + 0,05 \left( \frac{v_m}{u_1} \right)^3} \right]^{2,3},$$

$$E_4 = \sqrt{\frac{u_1}{u_{1M}}} \frac{\left( \frac{u_1}{u_{10}} \right)^{n_1} \left( \frac{u_1}{u_{10}} \right)}{\left( \frac{u_{1M}}{u_{10}} \right)^{n_1} \left( \frac{u_{1M}}{u_{10}} \right)} \left[ \frac{1 + 0,2 \frac{v_m}{u_1} \sqrt[3]{f} + 0,05 \left( \frac{v_m}{u_1} \right)^3}{1 + 0,2 \frac{v_m}{u_{1M}} \sqrt[3]{f} + 0,05 \left( \frac{v_m}{u_{1M}} \right)^3} \right]^{1,2}.$$

Далі виконується перетворення розрахункових формул до вигляду, зручного для їх практичного застосування. Основним показником ступеня забруднення повітря в промисловому районі є найбільша величина можливої концентрації  $c_m$ . Відповідно до гігієнічних вимог величина  $c_m$  не повинна перевищувати значення максимальної разової гранично допустимої концентрації. Вираз для  $c_m$  в разі легкої газоподібної домішки знайдемо з формули (5.31) для  $q_m$ , а для важкої домішки слід врахувати (2.34) з роботи [151]. Тоді розрахунковій формулі можна надати такий вигляд формули (1), в якій :

$$A = 1,54 C_3 \frac{\lg \frac{z_\Phi}{z_0}}{\lg \frac{z_1}{z_0}} G_2(f_0) K \Big|_{u_1 = u_{10}} \quad (5.34)$$

або спрощено  $A = a K \Big|_{u_1 = u_{10}}$ , де  $a$  — постійна величина. Значення  $a$  дещо залежить від шорсткості підстеляючої поверхні  $z_0$  і від висоти приземного шару  $h$ . Висота  $h$  приймається такою, щоб  $c_m$  досягало максимальних значень. При середній шорсткості для умов рівної місцевості постійна  $a$  дорівнює 0,3 [151]. У формулу (1) введено також коефіцієнт  $n$ , який апроксимує коефіцієнт  $E_l$  з формули (5.31). Значення  $K$  в (5.34) відповідає найбільшим значенням  $\Delta T$  при швидкості вітру  $u_{10} = 2$  м/с і нестійкій стратифікації атмосфери. Коефіцієнт  $A$  визначено також співвідношенням

$$A = a \frac{k_1}{u_1 \varphi_0} \Big|_{u_1 = 2 \text{ м/с}}$$

Коефіцієнти  $m$  за формулою (5.3) і  $n$  виражаються інтерполяційними формулами:

$$\begin{aligned} n &= 3 - \sqrt{(v_m - 0,30)(4,36 - v_m)} \text{ при } 0,3 \text{ м/с} \leq v_m \leq 2 \text{ м/с} \\ n &= 3 \text{ при } v_m < 0,3 \text{ м/с} \text{ и } n = 1 \text{ при } v_m > 2 \text{ м/с}. \end{aligned} \quad (5.35)$$

Величина небезпечної швидкості  $u_m$  визначається згідно (5.30), де окремо розглядаються випадки  $v_m < 2$  м/с і  $v_m > 2$  м/с. Однак при досить малих  $v_m$  ( $< 0,5$  м/с) розрахунок  $u_m$  за формулами (5.30) не має реального сенсу, так як такі малі швидкості вітру практично не вимірюються і порівняно рідко спостерігаються при нестійкій стратифікації атмосфери. Тому доцільно при  $v_m < 0,5$  м/с вважати  $u_m \sim 0,5$  м/с.

Значення  $c_m$ , яке визначається формулою (5.1), відноситься до відстані

$$x_m = dH, \quad (5.36)$$

де  $d$  встановлюється для тих же умов, для яких визначається  $c_m$ , коефіцієнт  $d$  залежить від  $u_m$  і  $f$ . При цьому можна замінити  $H^{0,2}$  середньою величиною  $H$ , що мало змінюється в широкому діапазоні. Величина  $d$  визначається за допомогою інтерполяційних формул

$$\begin{aligned} d &= 4,95 v_m (1 + 0,28 \sqrt{f}) \text{ при } v_m > 2 \text{ м/с}, \\ d &= 7 \sqrt{v_m} (1 + 0,28 \sqrt[3]{f}) \text{ при } v_m > 2 \text{ м/с}. \end{aligned} \quad (5.37)$$

При достатньо великих  $v_m$  величина  $d$  змінюється від 15 до 25, але в середньому виконується співвідношення  $x_m = 20H$ , відповідне результатам, наведеним в [151, 152]. При  $v_m > 2$  м/с і  $f < 6$  м/(с<sup>2</sup>·°С)  $u_m \approx v_m$  для теплових електростанцій і потужних металургійних заводів зазвичай  $u_m = 3-5$  м/с, для порівняно холодних викидів хімічного виробництва  $u_m = 1-2$  м/с.

Найбільше значення концентрації  $c_y$  по осі  $y$  на відстані  $x$  визначається відповідно до наступної формули:

$$\bar{q} = \frac{q'(X, z)}{2 \sqrt{\pi X}} e^{-\frac{y^2}{4X}}, \quad (5.38)$$

з урахуванням залежності  $\varphi_0$  від  $u$ . Можна записати

$$c_y = c s_2 \left( \frac{|y|}{x} \right)$$

де

$$s_2 \left( \frac{|y|}{x} \right) = \left[ 1 + 8,4u \left( \frac{y}{x} \right)^2 \right] \left[ 1 + 28,2u^2 \left( \frac{y}{x} \right)^4 \right].$$

Звідси випливає, що залежність  $s_2$  від  $u$  більш істотна при порівняно малих  $u$  і значно слабкіша для діапазону відносно великих швидкостей вітру.

Для практичних розрахунків важливе значення мають також випадки холодних викидів при малих  $\Delta T$ . До них відносяться багато видів вентиляційних викидів безпосередньо з виробничих приміщень. Отримані формули (5.27-5.37) справедливі в широкому діапазоні зміни  $u$ ,  $v_m$  і  $f$ . За ними можна проводити розрахунки, зокрема, і для порівняно холодних викидів, коли  $v_m < 0,5$  м/с, а  $f$  досягає 100 м/(с<sup>2</sup>·°С) і більше. Разом з тим доцільно розглянути граничний випадок холодних викидів при  $\Delta T = 0$ , коли  $w_m = 0$ , а  $f \rightarrow \infty$ . Для цього зручно повернутися до

формули (5.28) для  $\Delta H$ , поклавши в ній  $\Delta T = 0$ . Тоді  $\Delta H = \frac{b_1 H}{u}$ , де  $b_1 = 2,5 \frac{w_0 R_0}{H}$ . Аналогічно висновку (5.29) встановлюється рівняння для знаходження небезпечної швидкості вітру  $u_1 = u_{1M}$

$$\frac{d}{du_1} \left[ u_1 \left( \frac{u_1}{u_{10}} \right)^{n_1} \left( \frac{u_1}{u_{10}} \right) \left( 1 + \frac{b_1}{u_1} \right)^{2,3} \right] = 0,$$

яке перетворюється до виду

$$u_{1M} \frac{1+t}{1,3-t} = b_1.$$

Тут  $t$  визначається з (3.42) [152]. Тоді отримуємо

$$q_M = \frac{C_3 K |_{u_1 = u_{10}} \left( \frac{u_{10}}{u_{1M}} \right)^{n_1} \left( \frac{u_{1M}}{u_{10}} \right)^{n_2} M}{u_{1M} H^{2,3} \left( 1 + \frac{b}{u_{1M}} \right)^{2,3}}, \quad (5.39)$$

$$x_M = C_4 \sqrt{u_{1M}} \left( \frac{u_{1M}}{u_{10}} \right)^{n_1} \left( \frac{u_{1M}}{u_{10}} \right)^{n_2} H^{1,2} \left( 1 + \frac{b_1}{u_{1M}} \right)^{1,2}.$$

Відповідні вирази для  $q_m$  і  $u_m$  при малих небезпечних швидкостях вітру приймають вид:

$$q_M = \frac{C_5 \sqrt{u_{10}} K |_{u_1 = u_{10}} M}{H^{0,8} (w_0 R_0)^{1,5}},$$

$$x_M = C_6 \frac{w_0 R_0}{\sqrt{u_{10}}} H^{0,2}, \quad (5.40)$$

де  $C_5 = 0,086C_1$ ;  $C_6 = 48C_2$  ( $C_1$  і  $C_2$  можна взяти з (5.20)).

Для зіставлення даних розрахунків  $q_m$  і  $x_m$  за загальними формулами при великих  $f$  і за формулами для холодних викидів зручно використовувати для  $\Delta H$  в якості вхідних параметрів  $b_1$  і  $f$  замість  $v_m$  і  $f$ .

Відмінності в  $x_m$  між нагрітими при  $f = 100$  м/(с<sup>2</sup>·°С) і холодними викидами невеликі, а при  $f = 1000$  м/(с<sup>2</sup>·°С) небезпечні швидкості в обох випадках практично збігаються. Розрахунки для викидів великих промислових та енергетичних підприємств [151-154] показали, що і відмінності в величинах максимальних концентрації  $q_m$  при  $f = 100$  м/(с<sup>2</sup>·°С) і для холодних викидів не перевищують 10-20% у всьому можливому діапазоні зміни параметра  $b_1$ . Слід зауважити, що великі значення  $f$  відповідають зазвичай умовам малих величин  $\Delta T$ , коли точне визначення останніх реально не є можливим.

Це дозволяє поширити загальні формули і на холодні викиди, коли  $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ . Для такого випадку практично досить перетворити розрахункові формули, виключивши з них  $\Delta T$ . Для цього слід в формулі (5.33) для  $c_m$  і в (5.2) для  $v_m$  підставити значення  $\Delta T = \Delta T_0$ , відповідне  $f = 100$  м/(с<sup>2</sup>·°С), тобто

$$\Delta T = \frac{10w_0^2 D}{H^2}.$$

Використання менших значень  $\Delta T$  для уточнення розрахунків практичного сенсу не має. Таким чином обґрунтовується формула (5.2) для холодних викидів.

Параметр  $n$  тут визначається як і раніше за допомогою формул (5.35) для поточного значення  $v_m$ , але вираз для обчислення  $v_m$  в даному випадку перетвориться до виду

$$v_m = 1,3 \frac{w_0 D}{H}.$$

Величина  $A$  при цьому зберігає зазначені вище значення, але змінює свою розмірність на  $m^{1/3}$ . За значенням  $v_m$ , згідно (5.37), знаходиться величина  $d$  і, отже, за допомогою (5.36) визначається  $x_m$ . У разі холодних викидів здебільшого значення  $c_m$  малі, тому, згідно з (5.30), зберігається співвідношення  $\tilde{u}_m \approx v_m$ .

Як показано вище, а саме що найбільше значення концентрації  $c_y$  уздовж осі  $y$  на відстані  $x$  визначається відповідно до формули (5.38), яка застосовує апроксимацію для визначення  $s_2$  з урахуванням залежності  $\phi_0$  від  $u$ , що визначається як експонента від координати  $y$  у формулі (5.17). Інтеграл від формули для розподілу концентрації у вигляді (5.17) знайдений вище і дорівнює

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{y^2}{a}\right) dy = \sqrt{\pi a} = \sqrt{2\pi} x \phi_0.$$

Тоді поперечно-інтегральна концентрація з урахуванням формул (5.26) з нормативної методики ОНД-86 [63]:

$$C_y = C_{\max} \frac{1,13\sqrt{2\pi\phi_0 x}}{0,13 + x_{\max}^2 x^2 + 1},$$

досягає максимуму в  $x = 2,7735x_{\max}$ , тобто майже втричі далі ніж  $x_{\max}$  на вісі факела 20-хвилинної усередненої концентрації за формулами ОНД-86, а максимум  $C_{y_{\max}}$  дорівнює

$$C_{y_{\max}} = C_{\max} \frac{1,13\sqrt{2\pi\phi_0 x}}{0,13 + x_{\max}^2 x^2 + 1} = C_{\max} \frac{1,13\sqrt{2\pi\phi_0 x_{\max}}}{\sqrt{2 \cdot 0,360555}} = 3,928\phi_0 x_{\max} C_{\max},$$

Таким чином, виконаний чисельний аналіз вказує на те, що пряме використання алгоритмів нормативної методики ОНД-86 [63] для *стаціонарного*

*пасивного* джерела викиду обумовлює в 2-3 рази менші значення максимальної поперечно-інтегральної концентрації (*варіант обчислення 7* в табл. 5.2), що утворюється на відстані в 2-3 рази більшій ніж отримані експериментальні результати, в тому числі наведені на рис. 5.2.

Отримані безрозмірні величини обчислення за спрощеною формулою стаціонарного Гауссового шлейфу (*варіант обчислення 3* в табл. 5.2) та результатами експериментальних досліджень в аеродинамічній трубі, рис. 5.2 добре узгоджуються між собою. Отримані результати аналітичних рішень моделі Гаусса (5.13–5.15) і моделі обчислення концентрації з урахуванням тривалості часу спостереження (5.22–5.25) також можуть бути узгоджені при умові коректного застосування значень метеопараметрів в формулах обчислення максимуму концентрації і відстані його утворення. Наприклад, результати обчислення поперечно інтегрованих значень концентрації  $C_y$  за аналітичними рішеннями (5.18–5.21) для миттєвої концентрації та усередненої за 20 хв. (5.22–5.25) вирізняються від аналогічних на рис. 5.2. Це можна пояснити використанням значень для швидкості вітру  $u_1$  та коефіцієнтів турбулентної дифузії  $k_1$  і  $k_0$  на висоті  $z_1=1$  м у формулах (5.18, 5.19), а не відповідних значень для висоти  $H=60$  м.

Зважаючи на наведені аргументи, досить легко пояснити відмінність результатів тестового сценарію для різних моделей. Подібно до залежностей на рис. 5.2, результати для моделі PolEmitCa в 2-3 рази нижчі від аналогічних для інших моделей, що в першу чергу пояснюється впливом ефекту усереднення концентрацій, обґрунтованому в даній роботі. Тим же ефектом усереднення (для моделей США AERMOD та Великобританії ADMS протягом однієї години) пояснюється більш широке розповсюдження поля концентрації для моделей AERMOD і ADMS, у порівнянні з моделями LASPORT і PolEmitCa. Останні моделі розроблені для обчислення миттєвих або осереднених концентрацій за коротший період часу 2-30 хв., як за нормативною методикою [63].

Виконаний аналіз моделей, в тому числі методики [63], дозволяє розробити рекомендації стосовно обчислення концентрацій в повітрі, що утворюються викидами ЗР з шахт витоку газів ГПА. За нормативною методикою [63]



концентрація оксидів азоту на межі охоронної зони КС (700м від межі КС) не перевищує ПДК (0,085 мг/м<sup>3</sup>) – табл. 5.1 (результати максимальної концентрації в межах 0,023...0,125 мг/м<sup>3</sup>, що утворюється на відстані ~300...650 м від джерела викиду). Але обчислені значення висоти спливання газів від шахти ГПА сягають ~50-225 м, орієнтовно 55-70% якої ( $\Delta H_{\Delta T} / \Delta H_{\text{Берлянд}}$ ) спричиняється термогравітаційною складовою (тобто різницею температур газів та оточуючого повітря  $\Delta T$ ). Застосування Гауссової моделі з визначенням висоти викиду  $\Delta H_{\text{еф}}$  по Берлянду зумовлює в 2-4 разів більші максимальні концентрації,  $C_{\text{max}} \sim 0,08 \dots 0,27$  мг/м<sup>3</sup>, і відповідно очікуються перевищення ПДК на межі охоронної зони.

Застосування скринінгової моделі SCREEN 3.0 Агенства Охорони Довкілля США [146] для обчислення висоти спливання газів за відсутності вертикальної складової швидкості струменя ( $\Delta H_{\text{ефSCREEN}} = 4 \dots 25$  м, тобто на порядок менші значення спливання газів над гирлом шахти) і Гауссової моделі обчислення максимальної концентрації, призводить до значень  $C_{\text{max}} \sim 0,85 \dots 5$  мг/м<sup>3</sup> на відстані ~100...250 м від джерела викиду, на багато перевищуючи ПДК на межі охоронної зони.

Таким чином, результати аналізу вказують на те, що при обґрунтуванні межі (границі) СЗЗ навколо КС з умов забруднення повітря викидами від ГПА за наявності дефлекторів над гирлом шахти слід враховувати тільки на термогравітаційну складову спливання газів  $\Delta H_{\Delta T}$ , яка становить 55-70% значень за формулою М.Берлянда  $\Delta H_{\text{Берлянд}}$  [151, 152]. В таких випадках концентрація на межі охоронної зони КС може перевищувати ПДК ЗР і границя розрахованої СЗЗ буде далі за її межами.

## Висновки по Розділу 5

1. Проаналізовано параметри джерел викидів забруднюючих речовин в районі компресорних станцій та їх впливу на місцеву якість повітря. Нормативна методика ОНД-86 [63] з обчислення максимальних концентрацій забруднюючих речовин внаслідок викидів стаціонарних джерел не враховує усіх можливих особливостей викиду, зокрема в частині пасивних стаціонарних джерел.

2. Тестовий сценарій для обчислення максимальних концентрацій та поля концентрацій ЗР в атмосферному повітрі визначений для найпростішого виду стаціонарного джерела – температура викиду дорівнює температурі навколишнього повітря і обсяг викиду повітряної суміші близький до нуля. В такому випадку визначальними для концентрації забруднення повітря є тільки висота джерела викиду та метеорологічні параметри. Результати обчислення максимальної концентрації для тестового сценарію за Гауссовими моделями, що верифіковані в САЕР, розходяться між собою майже в 2 рази. Мінімальне значення отримано для моделі ADMS  $\sim 2$  мкг/м<sup>3</sup>, максимальне – для моделі AERMOD  $\sim 3,5$  мкг/м<sup>3</sup>. Аналогічний результат за моделлю PolEmitCa  $\sim 1,5$  мкг/м<sup>3</sup> майже вдвічі менший, що обумовлено включенням в алгоритми методики ОНД-86 ефектів початкового підйому викиду повітряної суміші від стаціонарного джерела. Формула (5.5) для цього випадку є дещо обмеженою (все-таки враховує відмінність обсягу викиду від нуля).

3. Для удосконалення моделі PolEmitCa, що має врахувати пасивні умови викиду стаціонарними джерелами ( $V_1 \approx 0$  та  $\Delta T \approx 0$ ), пропонується враховувати аналітичні рішення рівнянь атмосферної дифузії [15, 16], що не включають ефекти початкового підйому викиду повітряної суміші від стаціонарного джерела (5.18–5.25). Зокрема *варіант обчислення 8* в табл. 5.2 – з усередненими даними уздовж висоти джерела викиду ( $u_H = 1,907$  м/с;  $k_0 = 0,36$  м/с;  $n=0,27$ ) вказує на максимально близькі результати до експериментальних (рис. 5.2) і саме ця обчислювальна модель (5.18–5.25) пропонується на доповнення до алгоритмів методики ОНД-86 для врахування пасивних умов викиду стаціонарними джерелами.

4. При обґрунтуванні границі СЗЗ навколо КС з умов забруднення повітря викидами від ГПА за наявності дефлекторів над гирлом шахти слід враховувати тільки на термогравітаційну складову спливання газів  $\Delta H_{\Delta T}$ , яка становить 55-70% значень за формулою М.Б ерлянда  $\Delta H_{\text{Берлянд}}$  [151, 152]. В таких випадках концентрація на межі охоронної зони КС може перевищувати ПДК досліджуваних ЗР і границя СЗЗ буде далі за її межами (понад 700 м).

## 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. В 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 вимірних). В залежності 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/м<sup>2</sup>) 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 листя з вугіллям, горючим сланцем і відходами відпрацьованих нафтопродуктів ГТУ ГПА КС. Результати екологічної експертизи показали, що паливо на основі опалого листя 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 листя та наповнювачів під час його використання як сировини для виготовлення палива.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Skone TJ, Littlefield J, Marriott J: Life Cycle Greenhouse Gas Inventory of Natural Gas Extraction, Delivery and Electricity Production. 2011, Pittsburgh, PA: United States Department of Energy, National Energy Technology Laboratory.
2. Викиди в атмосферне повітря: Держстат проаналізував регіони та галузі за 2020 рік. <https://ua-energy.org/uk/posts/vykydy-v-atmosferne-povitria-derzhstat-proanalizuvav-rehiony-ta-haluzi-za-2020-rik>.
3. Colborn T, Schultz K, Herrick L, Kwiatkowski C: An exploratory study of air quality near natural gas operations. *Hum Eco Risk Assess Int J*. 2013, 20: 86-105.
4. Witter R, McKenzie L, Towle M, Stonson K, Scott K, Newman L, Adgate J: Health Impact Assessment for Battlement Mesa, Garfield County Colorado. 2010, Aurora, CO: Colorado School of Public Health.
- 5 Bunch AG, Perry CS, Abraham L, Wikoff DS, Tachovsky JA, Hixon JG, Urban JD, Harris MA, Haws LC: Evaluation of impact of shale gas operations in the Barnett Shale region on volatile organic compound sin air and potential human health risks. *Sci Total Environ*. 2013, 468: 832-842.
6. Morris J, Song L, Hasemyer D: Big Oil, Bad Air: Fracking the Eagle Ford Shale of South Texas. 2014, Washington, DC: Center for Public Integrity.
7. Field RA, Soltis J, Murphy S: Air quality concerns of unconventional oil and natural gas production. *Environ Sci Process Impacts*. 2014, 16: 954-969. 10.1039/c4em00081a.
8. Экологический отчет ПАО «Газпром» за 2019 год <https://www.gazprom.ru/f/posts/77/885487/gazprom-environmental-report-2019-ru.pdf>.
9. Скріпка О.А. Контроль технічного стану відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів на принципах нейронних мереж: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.11.13—"Методи і прилади контролю та визначення складу речовин" / О.А. Скріпка. – Івано-Франківськ, 2007. – 19 с.

10. Корпоративний річний звіт з охорони довкілля 2018 рік. Група Нафтогаз. <https://www.naftogaz.com/files/Activities/Grupa-Naftogaz-Oxorona-dovkillya-2018.pdf>.

11. Witter R, McKenzie L, Towle M, Stinson K, Scott K, Newman L, et al. Health Impact Assessment for Battlement Mesa, Garfield County Colorado [Internet]. 2010. Available from: <http://www.garfield-county.com/public-health/documents/1CompleteHIAwithoutAppendixD.pdf>.

12. New York State Department of Environmental Conservation (NYSDEC). Revised draft supplemental generic environmental impact statement on the oil, gas, and solution mining regulatory program: Well permit issuance for horizontal drilling and high-volume hydraulic fracturing to develop the Marcellus Shale and other low-permed. 2011.

13. Mccawley M. Air, noise, and light monitoring results for as session environmental impacts of horizontal gas well drilling operations. Morgantown; 2013.

14. U.S. Environmental Protection Agency O of NA and C. Information on level so environmental is erequi site to protect public health and well farewell than a dequatemarg in of safety [Internet]. NPC Online Library. 1974 [cited 2014 Feb 9]. Available from: <http://www.nonoise.org/library/levels74/levels74.htm>.

15. 6. Mary land Institute for Applied Environmental Health U of MCP. Potential Public Health Impacts of Natural Gas Development and Production in the Marcellus Shale in Western Mary land [Internet]. College Park; 2014. Available from: <http://www.marcellushealth.org/final-report.html>.

16. Cusick M. State regulator stake a closer listen to gas compressor stations [Internet]. 2014 [cited 2016 Feb 9]. Available from: <https://stateimpact.npr.org/pennsylvania/2014/08/25/state-regulators-take-a-closer-listen-to-gas-compressor-stations/>.

17. Семчук Я.М. Оцінка впливу компресорних станцій магістральних газопроводів на навколишнє середовище / Я.М. Семчук, Л.Б. Чабанович // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ : Державний міжвід. наук.-техн. зб. – Сер.: Розробка та експлуатація нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ. – 1996. – Вип. 33. – С. 141-145.

18. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива / И.Я. Сигал. – Л.: Изд-во "Недра", 1988. – 312 с.
19. Островская А. В. Воздействие системы транспорта газа на окружающую среду. Часть 2. Учебное пособие. Екатеринбург 2017 г.
20. Терехов А.Л. Газовая промышленность 2/748 2017.
21. Терехов А.Л. Снижение шума газоперекачивающих агрегатов на компрессорных станциях магистральных газопроводов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва 2005.
22. "Регламент проведения акустического расчета на стадии проектирования компрессорных станций, дожимных компрессорных станций, компрессорных станций подземных хранилищ газа. СТО Газпром 2-2.1-127-2007.
23. Защита от шума технологического оборудования ОАО «Газпром»: стандарт организации. СТО Газпром 2-3.5-043–2005. Режим доступа: [http://www.ohranatruda.ru/ot\\_biblio/normativ/data\\_normativ/49/49220](http://www.ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/49/49220).
24. Емельянов О.Н. Разработка эффективных глушителей шума систем сброса газа на компрессорных станциях. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. по спец. 05.02.13, Москва – 2011.
25. Заяц Б. С. Снижение шума при эксплуатации газоперекачивающих агрегатов компрессорных станций: дис. канд. техн. наук / Б. С. Заяц. Самара, 2008. Режим доступа: <http://tekhnosfera.com/snizhenie-shuma-pri-ekspluatatsii-gazoperekachivayuschih-agregatov-kompressornyh-stantsiy-magistralnyh-azoprovodov#ixzz3yt3wu6X8>.
26. Григорьян Ф. Е., Перцовский Е. А. Расчет и проектирование глушителей шума энергоустановок. — Л.: Энергия. Ленингр. отделение, 1980.
27. Заяц Б.С., Заяц И.Б., Яговкин Н.Г. Снижение шума на газораспределительных станциях магистральных газопроводов // Вектор науки ТГУ. 2013. № 3.– С. 181-183.
28. Meleah D. Boyle, et al. A pilot study to assess residential noise exposure near natural gas compressor stations Published: April 3, 2017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174310>.



29. Postnikov G., Reznik V. Determination of sanitary protective zones under the factor of noise from compressor stations. 4<sup>th</sup> International Congress on Sound and Vibration, 24-27 June 1996, St. Petersburg, Russia, p. 533-536.

30. ДБН В.1.1-31:2013. Захист територій, будинків і споруд від шуму. Київ: МінрегіонУкраїни, 2014. 85 с.

31. СТО Газпром 2-3.5-041. Каталог шумовых характеристик газотранспортного оборудования. Утв. Распоряжением ОАО «Газпром» от 22 сентября 2005 г. № 239 с 10 ноября 2005 г.

32. ГОСТ 27409-97 Шум. Нормування шумових характеристик стаціонарного обладнання. Основні положення.

33. ГОСТ 12.1.036-81 ССБТ. Шум. Допустимые уровни в жилых и общественных зданиях.

34. ДСТУ-Н Б В.1.1-32:2013. Настанова з проектування захистувід шуму в приміщеннях засобами звукопоглинання та екранування. Київ : МінрегіонУкраїни, 2014. 47 с.

35. ДСТУ-Н Б В.1.1-33:2013. Настанова з розрахунку та проектування захисту від шуму сельбищних територій. Київ : Мінрегіон України, 2014. 46 с.

36. Щуровский В.А., Левыкин А.П. Загрязнения и очистка проточных частей осевых компрессоров газотурбинных установок. М., ВНИИЭГАЗПром. Обз. информация. Серия - Транспорт и хранение газа. - 1986,- вып. 11, с. 28, код по рубрикатору 7 3.39.41.

37. Арсеньев Л.В., Тырышкин В.Г. и др. "Стационарные газотурбинные установки", Л., Машиностроение, ЛО, 1989.

38. Фишер А.Б. Исследование влияния эрозионного износа лопаток- осевых компрессоров на их аэродинамические и прочностные характеристики. - Дис. на соиск уч. степени к.т.н Л,- 1980.

39. Тарабрин А.П., Щуровский В.А. Анализ влияния эксплуатационных факторов на характеристики осевых компрессоров и ГТУ нового поколения. - Отчет НПО ЦКТИ- ВНИИГАЗ, М-С.Пб, 1994, 45 с.

40. Калюжный Д.Н. Гигиена внешней Среды в районе размещения промышленных предприятий. - Киев: Медицина, 1973, 246 с.
41. Шальман Ю.И. Износ и изменение параметров осевой и центробежной ступеней при работе на запыленном воздухе. - Вертолетные газотурбинные двигатели: Сборник статей. - М.: Машиностроение, 1966, с. 163-198.
42. Тихонов Н.Д., Боковой В.В. Определение допустимого износа проточной части вертолетного газотурбинного двигателя, работающего в условиях запыленности воздуха. Газодинамика и характеристика авиадвигателей, 1975, вып. 1, с. 38-55.
43. Алексеев А.В., Ефремов В.Г., Михайлов Е.И. Об инородных включениях в цикловой воздух и требования к: воздухозаборным устройствам ГТУ. - "Энергомашиностроение", 1970, № 2, с. 7-9.
44. Patterson J.R. Gas Turbine Inlet Air Treatment. General Electric ESDA-74G2, 1974, 58 p.
45. Grant G., Tabakoff W. Erosion prediction in turbomachinery due to environmental solid particles. - AIAA Pap., 1974, No 16, 16 p.
46. Компресорні станції: підручник / Г. А. Бондаренко, Г. В. Кирик. – Суми: Сумський державний університет, 2016. – 385 с.
47. Diakunchak I.S. "Performance Deterioration in Industrial Gas Turbine", 1991г., А ЯМ F, Paper № 91-GT- 228.
48. Михайлов Е.И., Резник В.А., Кринский А.А. "Комплексные воздухоочистительные устройства для энергетических установок". "Машиностроение", Л. 1978, 14 4 стр.
49. Stalder J.-P. Gas turbine compressor washing state of the art-field experiences. ASME Paper 98-6T-420, presented at the Inter. GT-Aeroengine Congress, Stockholm, Sweden, June, 2-5, 1998.
50. Ольховский Г.Г. Энергетические газотурбинные установки. М., Энергоатомиздат. 1985, 304 с.
51. Ольховский Г.Г. и др. Очистка компрессоров установки ГТ-25-7 00 на ТЭЦ-2 Киевэнерго. "Электрические станции" №1, 1971.

52. Ольховский Г.Г., Сквирский И.Н. "Итоги эксплуатации газотурбинной установки ГТ-25-7 00-1 ЛМЗ", Сб. "Освоение и эксплуатация энергетических газотурбинных установок. Труды ВТИ 1978г., вып. 16, с. 99-123.

53. Сквирский И.Н. и др. Опыт эксплуатации газотурбинной ГРЭС. - Труды ВТИ, 1978. Вып. 16, с. 74-98.

54. Розенберг Г.Ш., Рослик Я.Ф., Косанев В.С. "Очистка проточных частей компрессоров без вскрытия". Труды ЦНИИМФ, Вып. 71, 1966, стр. 60-70.

55. Щуровский В.А. Газотурбинные газоперекачивающие агрегаты / В.А. Щуровский, Ю.А. Зайцев. – М. Недра. – 1994. – 192 с.

56. Орберг А.Н. О модернизации газоперекачивающих агрегатов ГТК-10-4 / А.Н. Орберг, В.В. Виноградов, С.И. Третьяков // Газовая промышленность. – 1998. – № 4. – С. 98-99.

57. <http://www.coldjet.com/en/index.php> The rising star in industrial cleaning applications.

58. [http://www.dryiceblastcleaning.com/Cleaning with dry ice](http://www.dryiceblastcleaning.com/Cleaning%20with%20dry%20ice).

59. Закон України «Про правовий режим земель охоронних зон об'єктів магістральних трубопроводів» Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2011, № 37, ст.371. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3041-17#Text>.

60. Правилами охорони магістральних трубопроводів. ПОСТАНОВА від 16 листопада 2002 р. N 1747, Київ, Про затвердження Правил охорони магістральних трубопроводів. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1747-2002-%D0%BF#Text>.

61. Закон України «Про санітарно-епідеміологічне благополуччя населення».

62. Про затвердження Державних санітарних правил планування та забудови населених пунктів: наказ МОЗ від 19.06.96 № 173 зі змінами від 18.05.2018 № 952. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0379-96>.

63. Методика расчета концентрации в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 97 с.

64. ГОСТ 28775-90. МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ Группа E23 АГРЕГАТЫ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИЕ С ГАЗОТУРБИНЫМ ПРИВОДОМ. Общие технические условия. В ДЕЙСТВИЕ Постановлением Государственного

комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 06.12.90 N 3071 Дата введения 1992-01-01.

65. СТО Газпром 2–3.5–138. Типовые технические требования к газотурбинным гпа и их системам.

66 СТО Газпром 2–1.19–332–2009. Технические нормативы выбросов. Газоперекачивающие агрегаты ОАО «Газпром»/ М.— 2009.

67. ГОСТ 29328–92. Установки газотурбинные для привода турбогенераторов. Общие технические условия [Электрон. ресурс] // Режим доступа: <http://nordoc.ru/doc/8–8682>

68. СТО Газпром 2-3.5-039-2005 Каталог удельных выбросов вредных веществ газотурбинных газоперекачивающих агрегатов. Общество с ограниченной ответственностью «Газпром экспо» Москва 2005.

69. СТО Газпром 060-2009 классификатор источников выбросов загрязняющих веществ дочерних обществ и организаций ОАО «Газпром». Общество с ограниченной ответственностью «Газпром экспо» Москва 2009.

70. Про затвердження списків і введення в дію гігієнічних регламентів шкідливих речовин у повітрі робочої зони і атмосферному повітрі населених місць. НАКАЗ МОЗУ від 23 лютого 2000 року N 30. <https://ips.ligazakon.net/document/MOZ663>.

71. ГОСТ Р ИСО 11042-1-2001. Государственный стандарт российской федерации. Установки газотурбинные. Методы определения выбросов вредных веществ. Дата актуализации: 01.01.2021. <https://meganorm.ru/Index/6/6577.htm>.

72. СТО Газпром 2-3.5-038. Инструкция по проведению контрольных измерений вредных выбросов газотурбинных установок на компрессорных станциях Дата введения - 2005-12-15 <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293841/4293841761.ht>.

73. Звіт з ОВД планової діяльності з реконструкції компресорної станції «Яготин». Реєстр. Номер 20192142852, ТОВ Екосистема, Київ, 2019. Розробник ТОВ НВП «Екосистема», 2019 р.

74. ДСТУ-Н Б В.1.1-35:2013 «Настанова з розрахунку рівнів шуму в приміщеннях і на територіях» (Київ, Мінрегіон України, 2014 р.).

75. Дондошанский В. К. и др. "Расчет и испытания проточной части газотурбинного двигателя". Л., "Машиностроение", 1972.
76. Ольховский Г.Г. "Тепловые испытания стационарных установок". М., "Энергия", 1971.
77. Zaba T. "Losses in Gas Turbines Due to Deposits on the Blading". *Revue Brown Boveri*. № 12, tome 67, December 1980, Baden | Suisse.
78. Diakunchak I.S. "Performance Détérioration in Industrial Gas Turbine", 1991 г., А ЯМ F, Paper № 91-GT- 228.
79. Тарабрин А.П., Гросман Ф.Е. Разработка пакета прикладных программ по расчету осевых компрессоров стационарных установок. - Труды седьмой Всесоюзной конференции "Повышение технического уровня, надежности и долговечности компрессоров".- Казань, 1986.
80. Hoefft R.F. Heavy-Duty gas turbine operating and Maintenance considérations. GER-3620B, 1993.
81. Saravanamutto H.I.H. and Lakshminarasimha A.N., 1985, "A Preliminary Assessment of Compressor Fouling", ASME Paper No. 85-GT-153, 1985.
82. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли - пыли, дымы и туманы. - 2-е изд., -Л.: Химия, 1972, - 427 с.
83. Aker G.F., Saravanamuttoo H.I.H., "Predicting Gas Turbine Performance Degradation due to Compressor Fouling Using Computer Simulation Techniques", ASMS Journal of Engineering for Power, Vol. Ill, 1989, p.p. 343-350.
84. Tarabrin A. P., Schurovsky V.A., Bodrov A. I. , Stalder J.-P. "AN analysis of axial compressors fouling and a cleaning method of their blading". *Journal of turbomachinery, Trans, of the ASME, Vol 120, No 2, april 1998, pp 256-261.*
85. Черкез А.Я. "Инженерные расчеты газотурбинных двигателей методом малых отклонений" М. , "Машиностроение", 1965.
86. Бодров А.И. Исследование загрязнения и усовершенствование системы промывки проточной части осевых компрессоров ГТУ. Специальность 05.04.12 - Турбомашинны и комбинированные турбоустановки. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт - Петербург 1999.

87. 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)
88. Маэно Н. Наука о льде / Н. Маэно. М.: Мир, 1988. – 231 с.
89. Богородский В.В. Лед / В.В. Богородский, В.П. Гаврило. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 384 с.
90. Hobbs P.V. Ice Physics / P.V. Hobbs. – Oxford: Univ. Press, 1974. – 864 p.
91. Зацепина Г.Н. Физические свойства и структура воды / Г.Н. Зацепина. – М.: МГУ, 1998. – 184 с.
92. Mishima O. The Relationship between Liquid, Supercooled and Glassy Water / O. Mishima, E. Stanley // *Nature*. – 1998. – Vol. 396. – P. 329-335.
93. Золотухин И.В. Фракталы в физике твердого тела / И.В. Золотухин // *Соросовский Образовательный Журнал*. – 1998. – № 7. – С. 108–113.
94. 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 протильодотвірними рідинами НАУ. *Проблеми тертя та зношення*. 2017. №2 (75). С. 120–128. (Наукове фахове видання України. Входить до наукометричних баз даних Index Copernicus, PИHЦ, EBSCO, WorldCat, Google Scholar, Crossref).
95. 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). С. 100–106. (Наукове фахове видання України. Входить до наукометричних баз даних Index Copernicus, PИHЦ, EBSCO, WorldCat, Google Scholar, Crossref).
96. 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).
97. 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). С. 67–74. (Наукове

фахове видання України. Входить до наукометричних баз даних Index Copernicus, PИHЦ, EBSCO, WorldCat, Google Scholar, Crossref).

98. 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 листя. Безпека життєдіяльності людини – освіта, наука, практика: Матеріали МНТК. – К.: НАУ. - 2005. – С. 32-33.

99. Карпенко С.В. Забруднення поверхонь осьового компресора газотурбінної установки та їх екологічні наслідки. *Проблеми тертя та зношення*. 2021. №2 (91). С.87–97. (Наукове фахове видання України. Входить до наукометричних баз даних Index Copernicus, PИHЦ, EBSCO, WorldCat, Google Scholar, Crossref).

100. Запорожець О.І., Савченко В.І., Карабцов Г.П., Соловейкіна А.К., Карпенко С.В. Паливо з біомаси на основі опалого листя. *Вісник НАУ*. 2010. № 1. С. 185–190. (Наукове фахове видання України).

101. Пат. u2017 10314, Україна МПК F25C1/10. Пристрій для отримання водяних гранул льоду різного діаметру, охолоджених до температури рідкого азоту. Запорожець О.І., Карпенко С.В., Пузік С.О.; заявник та патентовласник: Запорожець О.І., Карпенко С.В., Пузік С.О. № 131499; заявл. 26.10.2017; опубл. 25.01.2019.

102. Пат. u2021 02241, Україна, МПК B08B9/0. Пристрій очищення внутрішньої поверхні резервуара стенда для дослідження силових очисників авіаційного палива. Запорожець О.І., Карпенко С.В., Пузік С.О.; заявник та патентовласник: Запорожець О.І., Карпенко С.В., Пузік С.О. № 148371; заявл. 12.04.2021; опубл. 28.07.2021.

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

104. Пат. u201105003, Україна МПК C09K5/00. Технічна рідина. Запорожець О.І., Соловейкіна А.К., Карпенко С.В.; заявник та патентовласник: Запорожець О.І., Соловейкіна А.К., Карпенко С.В. № 65016; заявл. 20.04.2011; опубл. 25.11.2011. Бюл. № 54.

105. *Mishima O.* The Relationship between Liquid, Supercooled and Glassy Water / O. Mishima, E. Stanley // *Nature*. – 1998. – Vol. 396. – P. 329-335.
106. Терехов А.Л., Дробаха М.Н. Современные методы снижения шума ГПА / Под ред. Р.О. Самсонова. — Спб.: «Недра». 2008. - 368 с.
107. КАТАЛОГ ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОТРАНСПОРТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ. Утв. Распоряжением ОАО «Газпром» от 22 сентября 2005 г. №239 с 10 ноября 2005 г.
108. ISO 1996-1:2003(E) Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise. Basic quantities and assessment procedures. Part 1. 2003. 32 p.
109. ISO 3891:2014. Acoustics – Procedure for describing aircraft noise heard on the ground. 2014. 24 p.
110. Про затвердження Державних санітарних норм допустимих рівнів шуму в приміщеннях житлових та громадських будинків і на території житлової забудови : наказ Міністерства охорони здоров'я від 22 лютого 2019 р. № 463. 6 с. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0281-19>.
111. Про затвердження Державних санітарних правил планування та забудови населених пунктів : наказ МОЗ від 19.06.96 № 173 зі змінами від 18.05.2018 № 952. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0379-96>.
112. ДБН В.1.1-31:2013. Захист територій, будинків і споруд від шуму. Київ : Мінрегіон України, 2014. 85 с.
113. ДСТУ-Н Б В.1.1-32:2013. Настанова з проектування захисту від шуму в приміщеннях засобами звукопоглинання та екранування. Київ : Мінрегіон України, 2014. 47 с.
114. ДСТУ-Н Б В.1.1-34:2013. Настанова з розрахунку та проектування звукоізоляції огорожувальних конструкцій житлових і громадських будинків. Київ: Мінрегіон України, 2014. 92 с.
115. ДСТУ-Н Б В.1.1-35:2013 Настанова з розрахунку рівнів шуму в приміщеннях і на територіях. Київ : Мінрегіон України, 2014. 57 с.
116. ДСТУ-Н Б В.1.1-33:2013. Настанова з розрахунку та проектування захисту від шуму сельбищних територій. Київ : Мінрегіон України, 2014. 46 с.



117. O. Zaporozhets, V. Tokarev, K. Attenborough. Aircraft Noise: Assessment, Prediction and Control. Published March 31, 2017 by CRC Press, ISBN 9781138073029, 432 p.
118. Бендат Дж., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа. - М.: Мир, 1983. - 312с.
119. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. - М.: Мир, 1989. – 540 с.
120. O. Zaporozhets, V. Tokarev, K. Attenborough. Aircraft Noise: Assessment, Prediction and Control. Published March 31, 2017 by CRC Press, 432 P., ISBN 9781138073029.
121. 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)*. September 22-24, 2020. Kyiv, Ukraine. Abstracts book. P. 78 (ISBN: 978-605-80140-4-6).
122. Карпенко С.В. Актуальність визначення рівнів звуку шуму від компресорних станцій. «*Problems of chemmotology*». VIII International Scientific-Technical Conference. Kyiv - Kamianets-Podilskyi, Ukraine, June 21-25, 2021. P. 69.
123. Карпенко С.В. Актуальність оцінки забруднення повітря викидами стаціонарних компресорних станцій. «*Problems of chemmotology*». VIII International Scientific-Technical Conference. Kyiv - Kamianets-Podilskyi, Ukraine, June 21-25, 2021. P. 77.
124. 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., м. Київ. Національний авіаційний університет. С.45–46.
125. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку ДСН 3.3.6.037-99, затв. Постановою Головного державного санітарного лікаря України від 01.12.99 N 37, ДСН 3.3.6.037-99) 1999.

126. ГОСТ 12.1.003-83\* ССБТ. Шум. Общие требования безопасности, in Russian), 1983.

127. ГОСТ 23337-2014. (ISO 1996-1:2003, NEQ, (ISO 1996-2:2007, NEQ) Шум. Методи вимірювання шуму на селитебній території і в приміщеннях житлових і суспільних будівель. 2015.

128. Защита от шума технологического оборудования ОАО «Газпром»: стандарт организации. СТО Газпром 2-3.5-042–2005. Методика расчета уровня шума от компрессорных станций. Введен в действие Распоряжением ОАО "Газпром" от 22 сентября 2005 г. № 237.

129. Борьба с шумом на производстве. Справочник. /Под ред. Е.Я. Юдина. - М.: Машиностроитель, 1985.

130. Терехов А.Л. Исследования и снижение шума на компрессорных станциях. - М: ООО «ИРЦ Газпром», 2002.

131. Защита от шума технологического оборудования ОАО «Газпром»: стандарт организации. СТО Газпром 2-3.5-041–2005. Каталог шумовых характеристик газотранспортного оборудования. Введен в действие Распоряжением ОАО "Газпром" от 10 ноября 2005 г. № 239.

132. Manning, C.J., The Propagation of Noise from Petroleum and Petrochemical Complexes to Neighbouring Communities, AT 931, Acoustic Technology Limited, May 1981.

133. American National Standards Institute, Committee S1, Acoustics, Method for calculation of the absorption of Sound by the Atmosphere, ANSI S1.26-1995, (1995).

134. Maekawa, Z., Noise Reduction by Screens, Mem. Faculty of Eng., Kobe University 11,29.53, (1965).

135. Справочник по технической акустике/Под ред. М. Хекла и Х.А. Мюллера. - Л.: Судостроение, 1980.

136. C.F. Chen and W.W. Soroka, "Sound propagation along an impedance plane", *JSV* 43 (1), 9-20 (1975).

137. M. E. Delaney, E. N. Bazley. Acoustic Properties of Fibrous Absorbent Materials. *Applied Acoustics*, 3(2), (1970).

138. K.B. Rasmussen: Sound propagation over grass covered ground, *J. Sound Vib.* 78, 247–255 (1981).

139. K. Attenborough: Ground parameter information for propagation modeling, *J. Acoust. Soc. Am.* 92, 418–427 (1992).

140. K. Attenborough, I. Bashir, S. Taherzadeh. Outdoor ground impedance models, *J. Acoust. Soc. Am.* 129(5), 2806–2819 (2011).

141. 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. (Наукове фахове видання України. Входить до наукометричних баз даних Scopus, EBSCO, DOAJ, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus).

142. L'Espérance et al., Heuristic model for outdoor sound propagation based on an extension of the geometrical ray theory in the case of a linear sound speed profile, *Appl. Acoust.* 37 111-139 (1992).

143. International Organization for Standardization. *Standard Atmosphere*. ISO 2533:1975, Ed. 1 108 (1975).

144. Бородавкин П. П. Охрана окружающей среды при строительстве и эксплуатации магистральных газопроводов/П.П. Бородавкин. М.: Недра, 1981. 160 с.

145. Козаченко А. Н. Эксплуатация компрессорных станций магистральных газопроводов / А. Н. Козаченко. М.: Нефть и газ, 1999. 463 с.

146. SCREEN3 Model User's Guide. EPA-454/B-95-004. September 1995.

147. ГОСТ Р 54404–2011. Установки газотурбинные для привода турбогенераторов. Общие технические условия [Электронный ресурс]. URL: <http://www.internet-law/gosts/gost/51298> (дата обращения 01.12.2016).

148. ГОСТ Р 54403–2011. Установки газотурбинные для привода турбогенераторов. Общие технические условия [Электронный ресурс] URL: <http://www.rubin01.ru/upload/idblock/b21/54403-2011.pdf> (дата обращения 01.12.2016).

149. Бызова Н.Л. Рассеивание примесей в пограничном слое атмосферы / Н.Л.Бызова. – М.: Гидрометеиздат, 1974. – 190 с.

150. ICAO Doc 9889. Airport Air Quality. – 1st ed. – 2011. – 200 p.
151. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М.Е. Берлянд. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 272 с.
152. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнение атмосферы / М.Е.Берлянд. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 448 с.
153. Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К. Турбулентность в пограничном слое атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 263 с.
154. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеивания примеси / Н.Л. Бызова, Е.К. Гаргер, В.Н. Иванов. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 278 с.
155. Zaporozhets O. Synylo K. Improvements on aircraft engine emission and emission inventory assessment inside the airport area // Journal of Energy. – 2017. – Volume 140. – P.1350-1357.
160. Feasibility study for a LAQ metric – evaluation of simple test cases CAEP/12-MDG-FESG/5-IP/09, Fifth Meeting – Virtual, 16 to 20 November 2020.
161. CAEP8\_MODTF\_5\_WP03\_LAQ\_Sample\_Problem.pdf.
162. CAEP10\_MDG08-WP02\_CAEPport Database.pdf.
163. Zaporozhets O.I., Synylo K.V. The main concepts of the PolEmiCA technique for stationary sources of emission in airports. Visnyk of National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific and Technical Collection. Kyiv. National Transport University. 2019. Vol. 3 (45). 179-191.
164. CAEP/12-FESG-MDG/2-WP/09.

### Основні характеристики розробленої технології промивки ГТУ із застосуванням гранул льоду

Технологія очищення ОК ГТУ заснована на використанні полідисперсних гранул льоду (Розділ 2 дисертації). Крижані гранули, виготовляються з води за спеціальною технологією і, за рахунок своїх особливих фізичних параметрів, дозволяють проводити очищення робочих поверхонь деталей всіх ступенів ОК ГТУ від експлуатаційних забруднень. Процес очищення заснований на використанні властивостей низькотемпературних крижаних гранул, який реалізується за рахунок кумулятивного ефекту гранул при контакті з твердою поверхнею. Дозована подача гранул, а також проява кумулятивного ефекту, не викликає охолодження поверхонь які очищуються. При цьому, за рахунок використання полідисперсного складу гранул, здійснюється більш повна і ефективна очистка поверхонь всіх ступенів ОК в порівнянні, наприклад, з мийкою ОК ГТУ водяними розчинами технічних миючих засобів.

Пристрій для отримання гранул льоду полідисперсного складу розміром від 2 до 5 мм наведений на рис. 2.9 дисертації. У ході проведення експерименту були отримані гранули низькотемпературного льоду аморфної структури (рис. 2.10) за допомогою холодоагенту – рідкого азоту. У ході проведення експерименту вода вприскувалась у ємність з рідким азотом, де вона перетворювалась у гранули.

Для досягнення льодовими гранулами всіх ступенів ротора ОК доцільно використовувати гранули з різним геометричним розміром. Тоді можна передбачити, що під час очищення гранули більшого розміру будуть зіштовхуватися з лопатками ротору ОК перших ступенів, роздрібнюватися, підхвачуватися потоком повітря і досягати останніх ступенів ротора ОК. Використання полідисперсного складу повинно підвищити ефективність очищення ротора ОК.

Зберігання та транспортування виготовлених гранул льоду здійснюється за допомогою контейнера з пінопласту високої щільності різного об'єму (рис. А.1).



Рисунок А.1 - Контейнер з пінопласту високої щільності для зберігання та транспортування виготовлених гранул льоду

Періодичне очищення ОК ГТУ можна здійснювати в процесі роботи ГТУ без її зупинки. Введення крижаних гранул в ОК здійснюється за допомогою спеціального пристрою для рівномірної подачі крижаних гранул по всьому контуру компресора, що створює оптимальний режим об'ємної подачі гранул льоду і високу ефективність очищення ОК ГТУ (рис. А.2). Схема підведення комунікацій і основні елементи арматури для системи подачі гранул до ОК ГТУ наведені на рис. А.3. Час промивки однієї ГТУ - 3 год. Час на роботі з підготовки однієї установки для очищення ОК ГТУ 1 год. Попередні випробування технології очищення поверхонь крижаними гранулами показали, що продуктивність очищення і її ефективність перевищує ефективність очищення поверхонь, наприклад кісточкової крихтою.

Послідовність промивання:

а) від'єднати від двигуна трубки:

- відведення повітря від КВТ до автомату Р0 і від датчика виміру перепаду на форсунках і до РКС;

- відведення газу від паливного колектору двигуна до того ж датчика виміру перепаду;

- виміру тиску в розвантажувальній порожнини КНТ;

- виміру тиску в розвантажувальній порожнини КВТ;

- виміру тиску в розвантажувальній порожнини ТН.

На звільнені штуцери встановити заглушки:

б) підготувати ГПА до ХП;

в) приготувати подачу гранул льоду;

г) провести ХП і при досягненні частоти обертання КНТ  $50 \dots 100 \text{ хв}^{-1}$

відкрити подачу гранул льоду до двигуна;

д) після закінчення ХП (при зниженні частоти обертання КНД до  $400 \dots 500 \text{ хв}^{-1}$ )

<sup>1)</sup> відключити подачу гранул льоду;

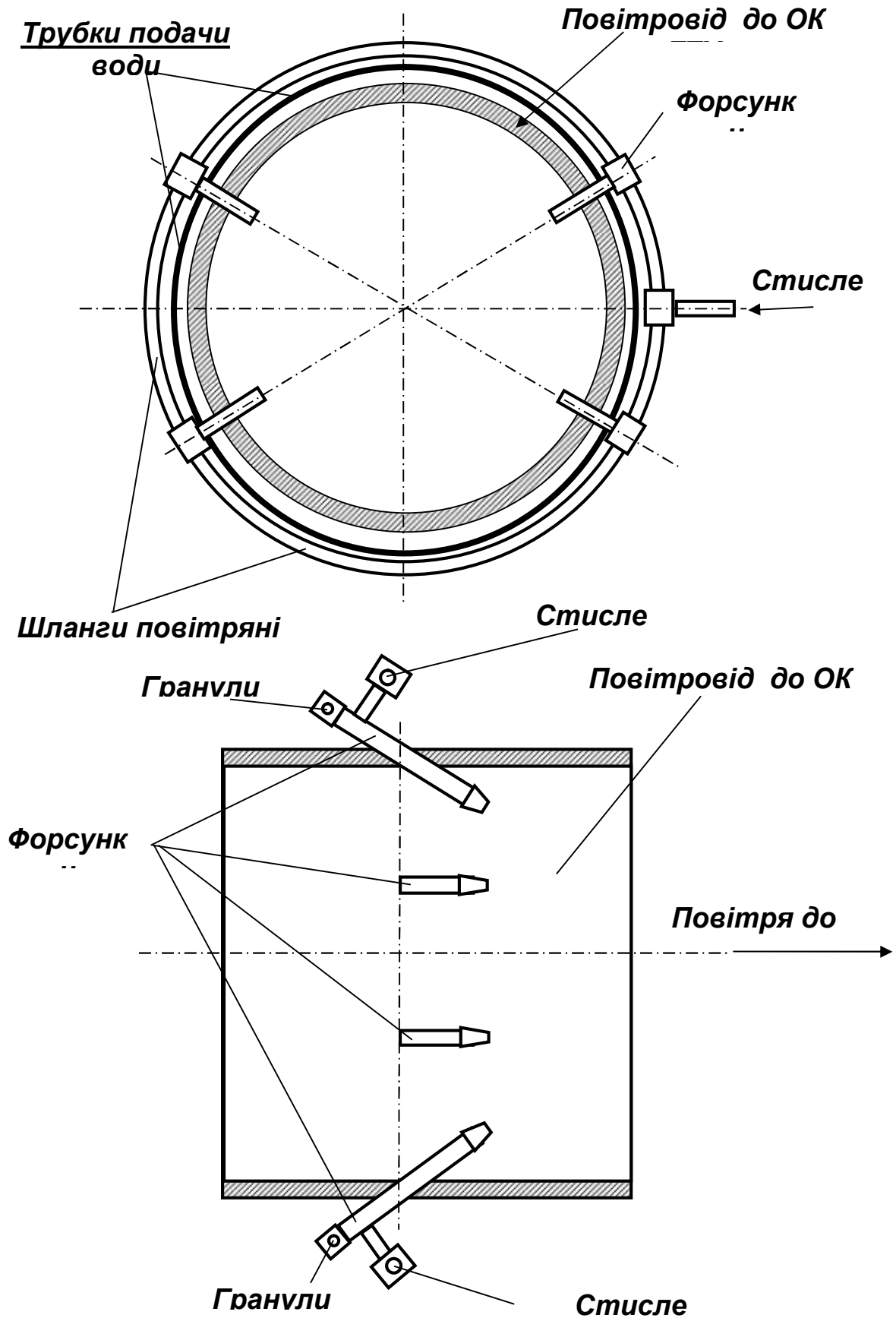


Рисунок А.2 - Схема обв'язки трубопроводу подачі гранул до ОК ГТУ

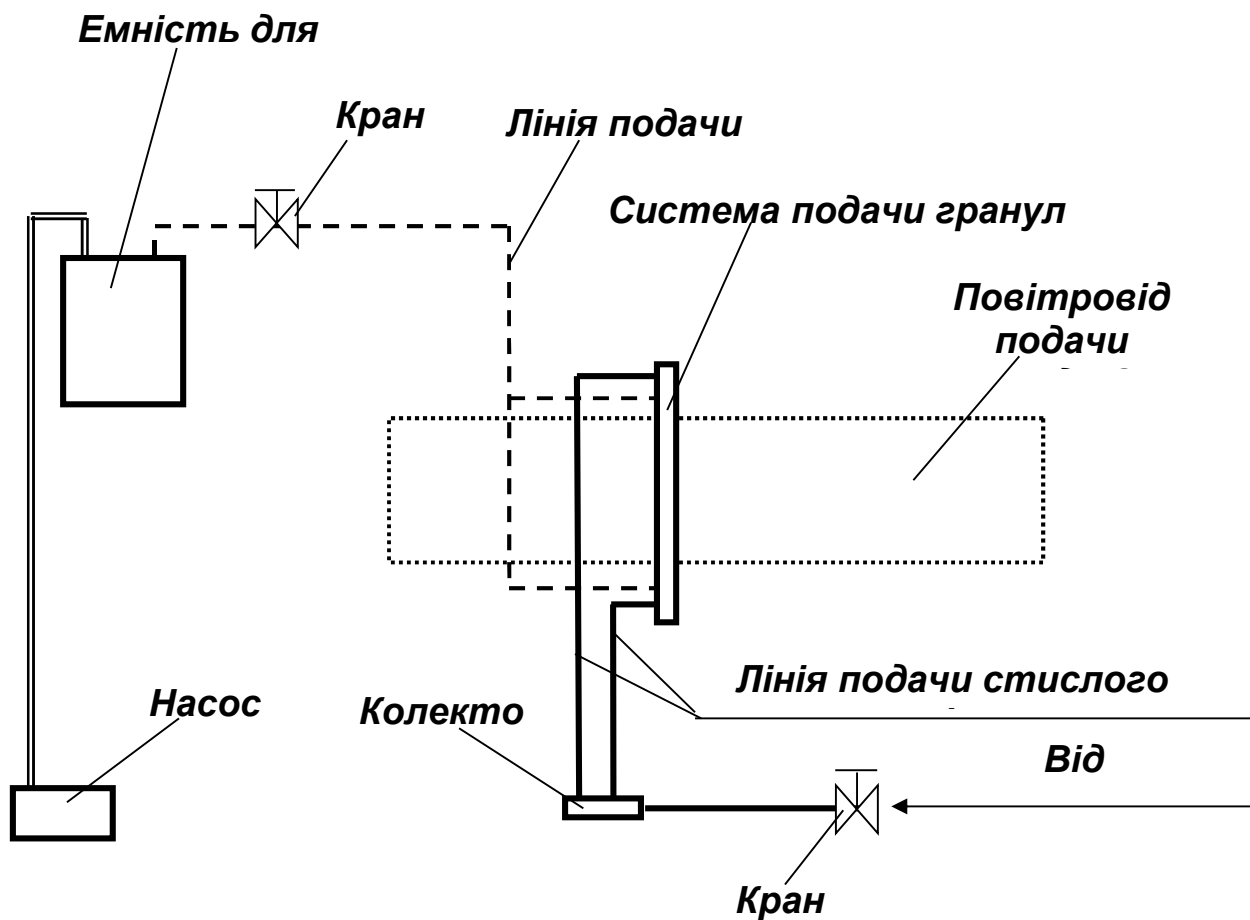


Рисунок А.3 - Схема підведення комунікацій і основні елементи арматури для системи подачі гранул до ОК ГТУ

Рекомендований порядок промивання і час ХП наведені в таблиці А.1.

Таблиця А.1 - Рекомендований порядок промивання і кількість ХП

Вид операції	Час промивання/об'єм	Вид промивання
ХП	2 години	Гранули льоду
ХП	10 хв	Вода
ХП	30 хв	Гранули льоду
ХП	10 хв	Вода

Після промивання потрібно взяти пробу масла з системи мастила двигуна на воду у разі виявлення води необхідно провести заміну мастила.



Для визначення гранично-допустимого проточної частини ГТД двигуна в процесі експлуатації необхідно контролювати зміни «Ковзання» і температури газів після ТВТ, перевірку зміни характеристик проводять на режимах вище 0,5N.

Для встановлення впливу очищення гранулами льоду осьового компресора на техніко-економічні параметри ГПА, був проведений експеримент при якому до початку запуску системи очищення, а також в після очищення виконувались виміри робочих параметрів ГТУ. До початку очищення та після проводилися виміри виміри робочих параметрів ГТУ. Виміри робочих параметрів ГТУ, виконувалось згідно з вимогами СТП 320.30019801.056-2002 "Комплексне обстеження надземного механічного технологічного обладнання компресорних станцій магістральних газопроводів".

Порівняльні основні технічні параметри до та після проведення очищення приведені в табл. А.2-А.3. На кожному контрольному режимі проводились не менше 3 виміри теплотехнічних параметрів, з різницею в часі не менше 5 хв. В протокол заносилось середньоарифметичне значення. Після проведення експериментального очищення гранулами льоду приведена ефективна потужність  $N_{\text{еpr}}$  збільшилась приблизно на 3%.

Таблиця А.2 - Розрахунок режимних параметрів роботи ГПА з газотурбінним приводом типу ГТК-10-4 до очищення

№ n/n	Найменування показника	Позн.	Розмір-ність	Значення вимірів		
				1	2	3
1	2	3	4	5	6	7
<b>Параметри навколишнього середовища</b>						
1	Барометричний тиск	H	мм.рт.ст	725	725	725
		B	ата	0,9856	0,9856	0,9856
2	Температура навколишнього середовища	t <sub>з</sub>	°C	15,7	16,8	17,3
		T <sub>з</sub>	K	288,7	289,8	290,3
<b>Фізико-хімічні властивості природного газу</b>						
3	Нижча теплотворна спроможність паливного газу	Q <sub>p</sub> <sup>н</sup>	ккал/м <sup>3</sup>	8 142	8 142	8 142
4	Питома вага газу в стандартних умовах	g <sub>0</sub>	кг/м <sup>3</sup>	0,711	0,711	0,711

5	Відносна питома вага газу по повітрю	$\Delta$	-	0,590	0,590	0,590
6	Газова постійна	R	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	0,487	0,487	0,487
<b>Параметри роботи осевого компресора</b>						
7	Перепад тиску на вході ОК	$\Delta P_3$	мм.вд.ст	70	60	70
8	Тиск на вході ОК	$P_3$	ата	0,9786	0,9796	0,9786
9	Тиск на виході з ОК	$P_4^{\text{зам}}$	ати	2,31	2,26	2,41
		$P_4$	ата	3,30	3,25	3,40
10	Ступінь стискання в ОК	$e_{\text{ок}}$	—	3,37	3,31	3,47
<b>Параметри роботи турбіни високого тиску</b>						
11	Частота обертів ТВТ	$n_{\text{твт}}$	об/хв	4470	4389	4548
12	Приведена частота обертів ТВТ	$n_{\text{твт}}^{\text{np}}$	об/хв	4465	4375	4530
13	Температура продуктів згоряння перед ТВТ	$t_1$	°C	632,2	621,7	647,9
14	Приведена температура перед ТВТ	$t_1^{\text{np}}$	°C	630,0	616,1	640,6
15	Тиск продуктів згоряння перед ТВТ	$P_1^{\text{зам}}$	ати	2,13	1,92	2,30
16		$P_1$	ата	3,1156	2,9056	3,2856
17	Ступінь розширення в турбіні	$e_m$	—	3,04	2,82	3,22
<b>Параметри роботи турбіни низького тиску</b>						
18	Частота обертів ТНТ	$n_{\text{тнт}}$	об/хв	3648	3550	3750
19	Приведені оберти ТНТ	$n_{\text{тнт}}^{\text{np}}$	об/хв	3644	3539	3735
20	Температура на виході ТНТ	$t_2$	°C	435,0	429,0	443,0
		$T_2$	K	708,0	702,0	716,0
21	Приведена температура за ТНТ	$t_2^{\text{np}}$	°C	434	427	440
22	Тиск на виході з ТНТ	$P_2^{\text{зам}}$	мбар	39,0	44,0	35,0
		$P_2$	ата	1,0253	1,0304	1,0213
<b>Розрахунок потужності та ККД агрегату</b>						
23	Параметр потужності	B	-	0,0100	0,0080	0,0118
24	Ефективна потужність на муфті ГТУ	$N_e$	кВт	2737	2180	3221
25	Приведена ефективна потужність	$N_e^{\text{np}}$	кВт	<b>2866</b>	<b>2278</b>	<b>3363</b>
26	Витрати паливного газу	$G_{\text{пг}}$	нм <sup>3</sup> /год	2155	1976	2185
27	Приведена витрата паливного газу	$G_{\text{пг}}^{\text{np}}$	нм <sup>3</sup> /год	2226	2038	2251
28	Ефективний к.к.д. ГТУ	$\eta_e$	%	13,60	11,81	15,78

Таблиця А.3 - Розрахунок режимних параметрів роботи ГПА з газотурбінним приводом типу ГТК-10-4 після очищення

№ п/п	Найменування показника	Позн.	Розмір- ність	Значення вимірів		
				1	2	3
1	2	3	4	5	6	7
<b>Параметри навколишнього середовища</b>						
1	Барометричний тиск	$H$	мм.рт.ст	725	725	725
		$B$	ата	0,9856	0,9856	0,9856
2	Температура навколишнього середовища	$t_3$	°C	15,7	16,8	17,3
		$T_3$	K	288,7	289,8	290,3
<b>Фізико-хімічні властивості природного газу</b>						
3	Нижча теплотворна спроможність паливного газу	$Q_p^H$	ккал/м <sup>3</sup>	8 142	8 142	8 142
4	Питома вага газу в стандартних умовах	$g_0$	кг/м <sup>3</sup>	0,711	0,711	0,711
5	Відносна питома вага газу по повітрю	$\Delta$	-	0,590	0,590	0,590
6	Газова постійна	$R$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{K}}$	0,487	0,487	0,487
<b>Параметри роботи осевого компресора</b>						
7	Перепад тиску на вході ОК	$\Delta P_3$	мм.вд.ст	70	60	70
8	Тиск на вході ОК	$P_3$	ата	0,9786	0,9796	0,9786
9	Тиск на виході з ОК	$P_4^{\text{зам}}$	ати	2,31	2,26	2,41
		$P_4$	ата	3,30	3,25	3,40
10	Ступінь стискання в ОК	$e_{ок}$	—	3,37	3,31	3,47
<b>Параметри роботи турбіни високого тиску</b>						
11	Частота обертів ТВТ	$n_{твт}$	об/хв	4470	4389	4548
12	Приведена частота обертів ТВТ	$n_{твт}^{np}$	об/хв	4465	4375	4530
13	Температура продуктів згоряння перед ТВТ	$t_1$	°C	634,8	624,2	650,5
14	Приведена температура перед ТВТ	$t_1^{np}$	°C	632,6	618,6	643,1
15	Тиск продуктів згоряння перед ТВТ	$P_1^{\text{зам}}$	ати	2,13	1,92	2,30
16		$P_1$	ата	3,1156	2,9056	3,2856
17	Ступінь розширення в турбіні	$e_m$	—	3,04	2,82	3,22
<b>Параметри роботи турбіни низького тиску</b>						
18	Частота обертів ТНТ	$n_{тнт}$	об/хв	3648	3550	3750
19	Приведені оберти ТНТ	$n_{тнт}^{np}$	об/хв	3644	3539	3735
20	Температура на виході ТНТ	$t_2$	°C	437,0	431,0	445,0
		$T_2$	K	710,0	704,0	718,0

21	Приведена температура за ТНТ	$t_2^{np}$	°C	436	429	442
22	Тиск на виході з ТНТ	$P_2^{зам}$	мбар	39,0	44,0	35,0
		$P_2$	ата	1,0253	1,0304	1,0213
<b>Розрахунок потужності та ККД агрегату</b>						
23	Параметр потужності	Б	-	0,0100	0,0080	0,0118
24	Ефективна потужність на муфті ГТУ	$N_e$	кВт	2826	2271	3326
25	Приведена ефективна потужність	$N_e^{np}$	кВт	<b>2956</b>	<b>2349</b>	<b>3468</b>
26	Витрати паливного газу	$G_{пг}$	нм <sup>3</sup> /год	2155	1976	2185
27	Приведена витрата паливного газу	$G_{пг}^{np}$	нм <sup>3</sup> /год	2226	2038	2251
28	Ефективний к.к.д. ГТУ	$\eta_e$	%	13,61	11,82	15,80

Для точного визначення  $N_e^{np}$  необхідне проведення випробувань ГТУ по повній програмі, що вимагає установки на агрегат додаткового (по відношенню до штатної) оснащення вимірювально-обчислювальними системами для постійного моніторингу всіх характеристик ГПА. Хоча, по зміні потужності і ККД ГТУ та витраті паливного газу можна визначити ефект від забруднення очищенням ОК, залежність витрат паливного газу від приведеної ефективної потужності для ГТУ типу ГТК-10И та ГТК-25И показані на графіках рис. А.4 і А.5.

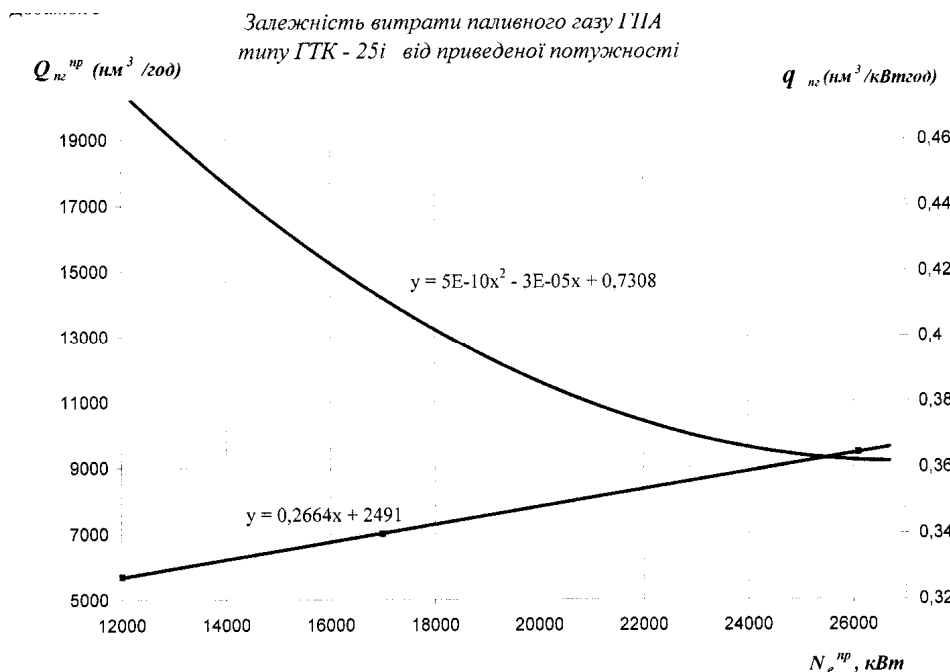


Рисунок А.4 - Залежність витрат паливного газу від приведеної ефективної потужності для ГТУ типу ГТК-10И

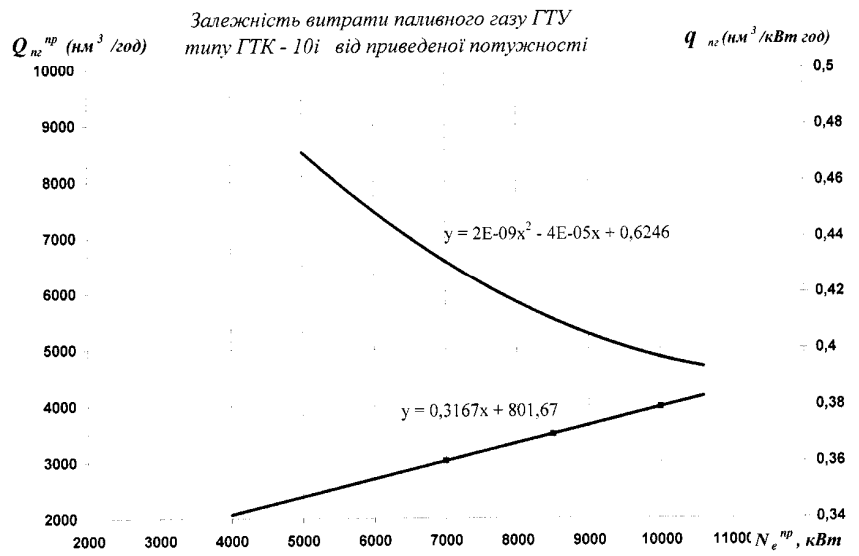


Рисунок А.5 - Залежність витрат паливного газу від приведеної ефективної потужності для ГТУ типу ГТК-25И

## Додаток Б

## Результати вимірювання шуму основних акустичних джерел ГПА ГТН-25И на КС Золотоноша

### Вимірювання шуму ГТУ всередині укриття ГПА-25И

РЗ шуму ГТУ всередині укриття ГПА-25И (точка 3 на рис. 3.4) наведені на рис. Б.1, їх основні величини визначені і наведені в табл. Б.1. Відповідно до вимог стандарту та санітарних правил шум ГТУ слід вважати *стаціонарним*. Спектральні третино-октавні РЗТ шуму ГТУ, визначені щосекундно протягом періоду запису 5 хв., наведені на рис. Б.2а.

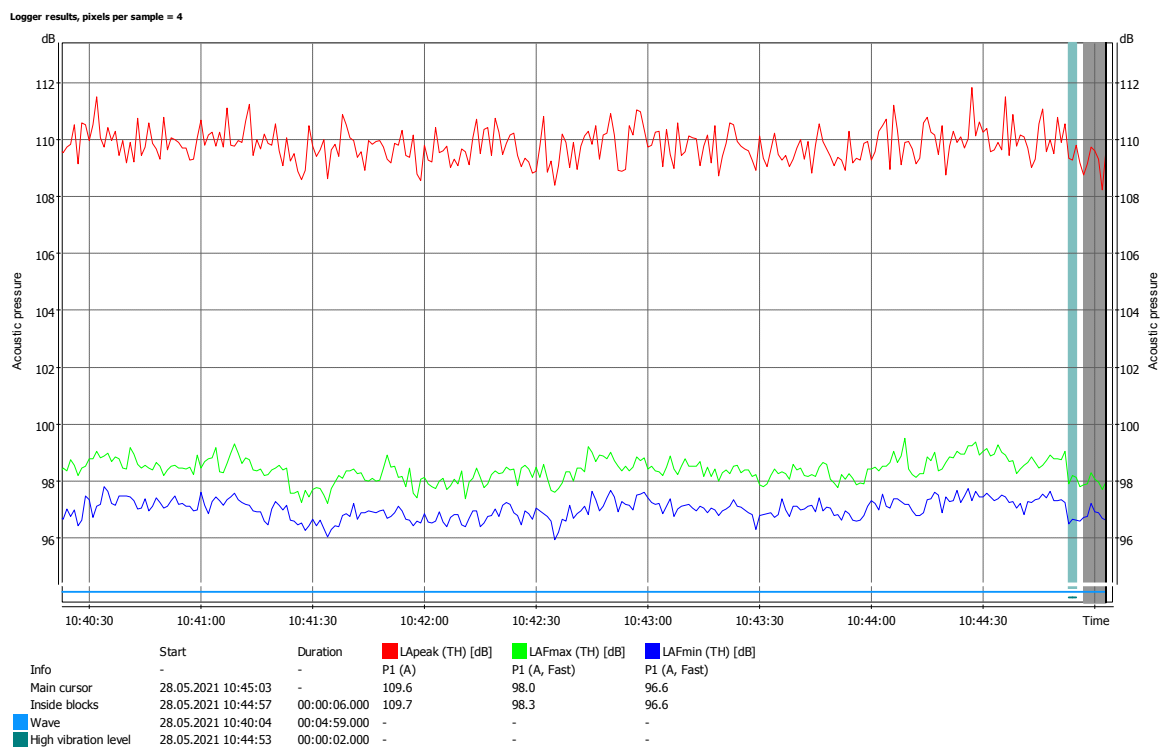


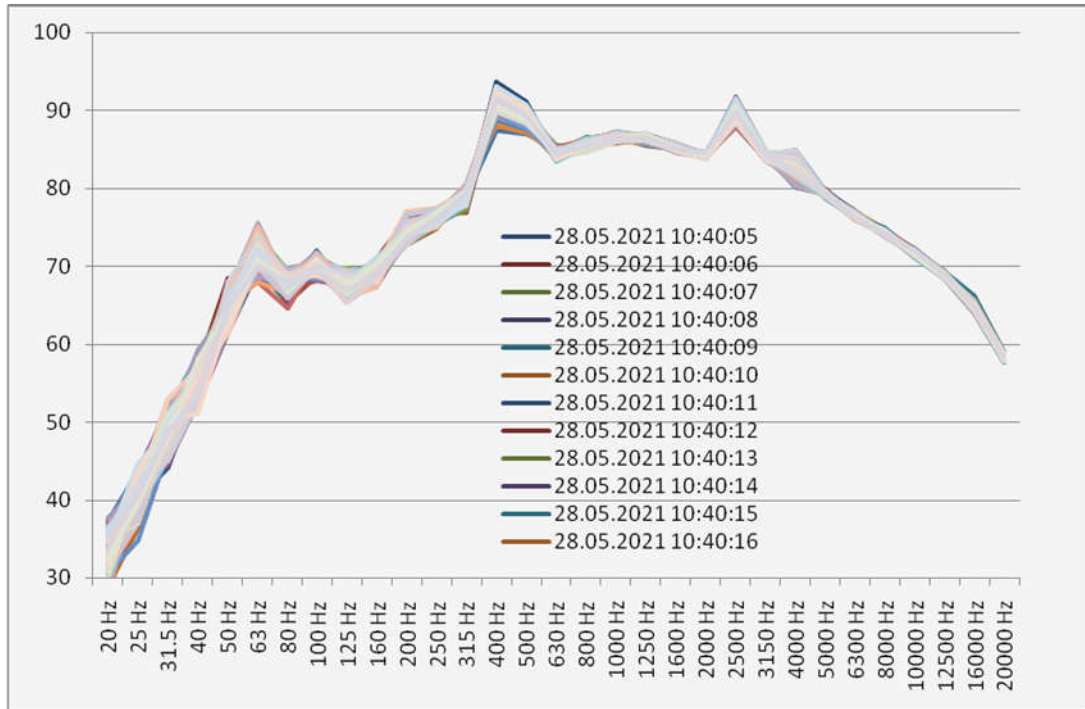
Рисунок Б.1 - РЗ шуму ГТУ всередині укриття ГПА-25И

(точка 3 на рис. 3.4 і в табл. Б.1)

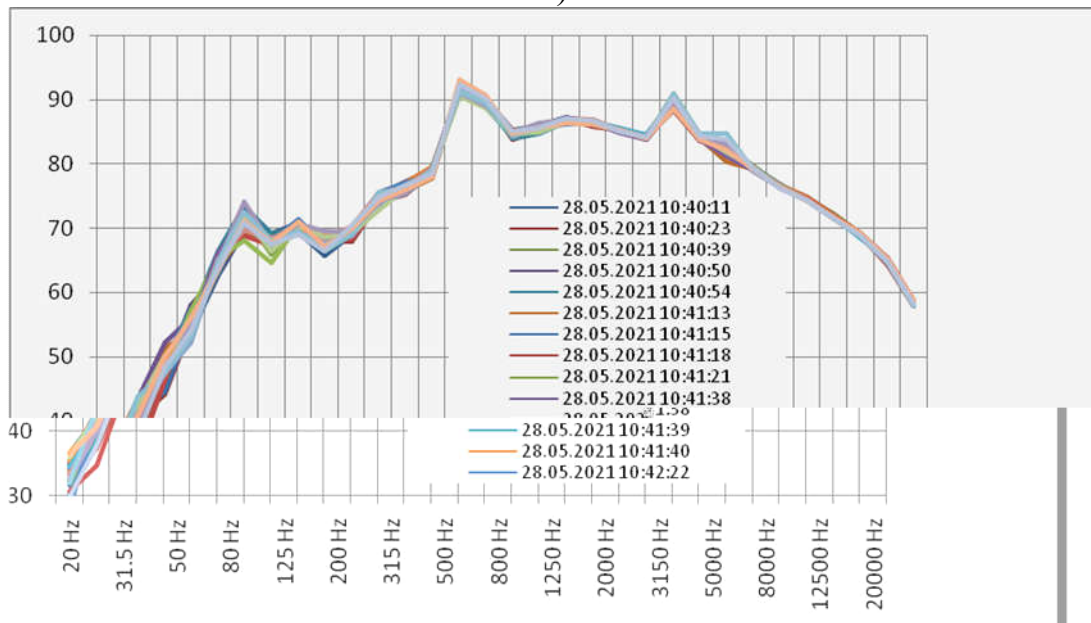
Таблиця Б.1 - РЗ шуму ГТУ всередині укриття ГПА-25И (точка 3 на рис. 3.4 і в табл. 3.1)

Виміряна величина	L <sub>Apeak</sub> , dBA	L <sub>AE</sub> , dBA	L <sub>AFmax</sub> , dBA	L <sub>AFmin</sub> , dBA	L <sub>Aeq</sub> , dBA
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

Для порівняння на рис. Б.2б наведені спектри шуму в моменти часу, коли поточне значення  $P_3(t)$  дорівнює середньому значенню за період запису шуму установки, в даному разі  $L_{AFmax}=89,39$  дБА. Спектри своєю подібністю між собою підтверджують стаціонарний характер джерела шуму, що досліджується.



а)



б)

Рисунок Б.2 - Третіно-октавні РЗТ шуму ГТУ в середині укриття ГПА: а) масив щосекундних спектрів шуму; б) спектрів шуму в моменти часу, коли поточне  $P_3(t)$  дорівнює середньому значенню за період запису шуму установки

Характер спектру шуму ГТУ ззовні (рис. Б.3) укриття ГПА-25И відповідає основним спектральним характеристикам шуму турбокомпресора всередині укриття (рис. Б.2) – наявні вузько-смугові складові випромінювання шуму в межах смуг 80, 315-500 і 2500 Гц.

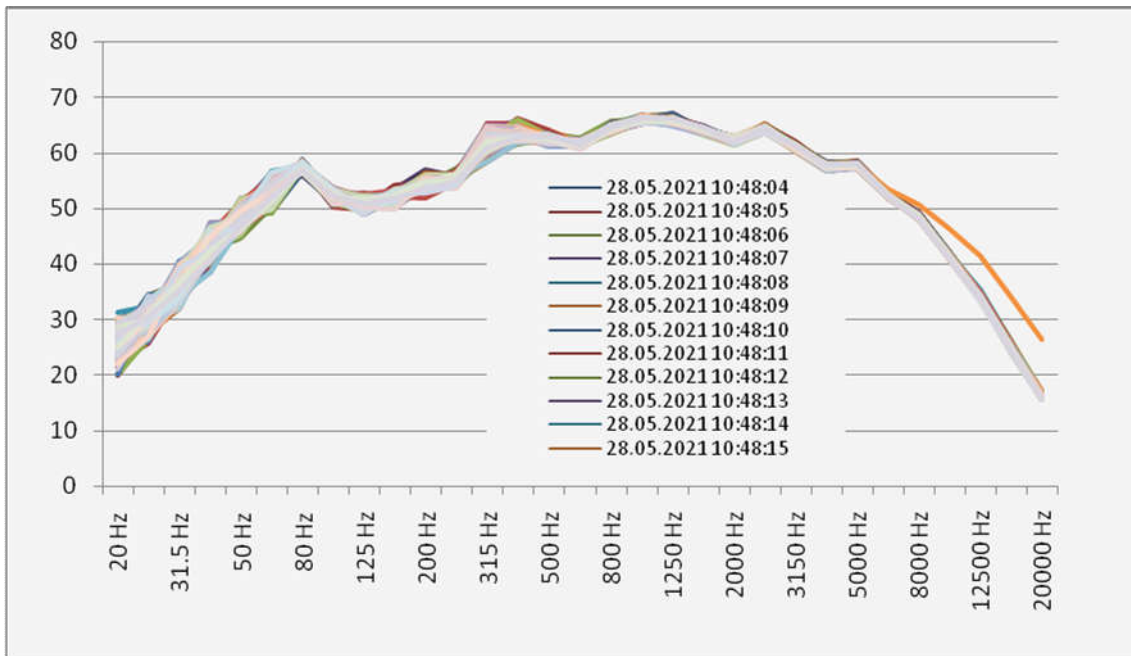


Рисунок Б.3 - Третино-октавні РЗТ шуму ГТУ ззовні укриття ГПА: наведений масив щосекундних спектрів шуму протягом періоду запису шуму установки спектрів шуму в моменти часу, коли поточне  $P_3(t)$  дорівнює середньому значенню за період запису шуму установки

Запис акустичних сигналів в точках 3 і 4 (рис. Б.4), а також в інших точках вимірювань, виконаний з включеним фільтром «А», що забезпечувало паралельне вимірювання РЗ в усіх точках. Тому в умовах лабораторного аналізу виміряні спектральні РЗТ внесені коригування в усіх смугах частот відповідно значенням фільтра «А» для цих частот.

### **Вимірювання рівнів звуку від шахти всмоктування повітря ГПА**

Рівні звуку шуму у довкіллі від шахти всмоктування повітря ГПА утворюються, в основному, роботою осьового компресора ГТУ. Дане комплексне акустичне джерело відноситься до провідних джерел шуму ГПА у цілому (табл. 3.1). Тому його експериментальне дослідження (в натурних умовах) з метою визначення внеску у загальне акустичне поле шуму ГПА є очевидним. Вимірювання шуму від



шахти всмоктування повітря виконано в декількох точках (позначення точок на рис. 3.4): 1 та 1' – з торця укриття (рис. Б.5а), та біля рогу торцевої стіни укриття – 2 і 2' (рис. Б.5б).



а)

б)

Рисунок Б.4 - Вимірювання шуму в точці 4 ззовні укриття ГПА



а)

б)

Рисунок Б.5 - Точки вимірювання шуму від шахти всмоктування повітря: а) з торця укриття (точки 1 і 1'); б) біля рогу торцевої стіни укриття (точки 2 і 2')

РЗ шуму від шахти всмоктування повітря ГПА-25И (точка 1) наведені на рис. Б.6, їх основні величини визначені і наведені в табл. Б.2. Відповідно до вимог стандарту та санітарних правил шум ГТУ слід вважати стаціонарним.

Таблиця Б.2 - РЗ від шахти всмоктування повітря ГПА-25И (точка 1 на рис. 3.4 і в табл. 3.2)

Виміряна величина	$L_{Apeak}, dBA$	$L_{AE}, dBA$	$L_{AFmax}, dBA$	$L_{AFmin}, dBA$	$L_{Aeq}, dBA$
Середнє	96,72	84,15	84,63	83,67	84,15
Максимум	98,93	85,15	85,63	84,67	85,15
Мінімум	94,95	82,77	83,3	82,38	82,77
Стандартне відхилення	0,78	0,42	0,46	0,43	0,42

Запис акустичних сигналів в точках 1 і 2 (рис. Б.6), а також в інших точках вимірювань, виконаний з включеним фільтром «А», що забезпечувало паралельне вимірювання РЗ в усіх точках. Тому у виміряні спектральні РЗТ внесені коригування в усіх смугах частот відповідно значенням фільтра «А» для цих частот.

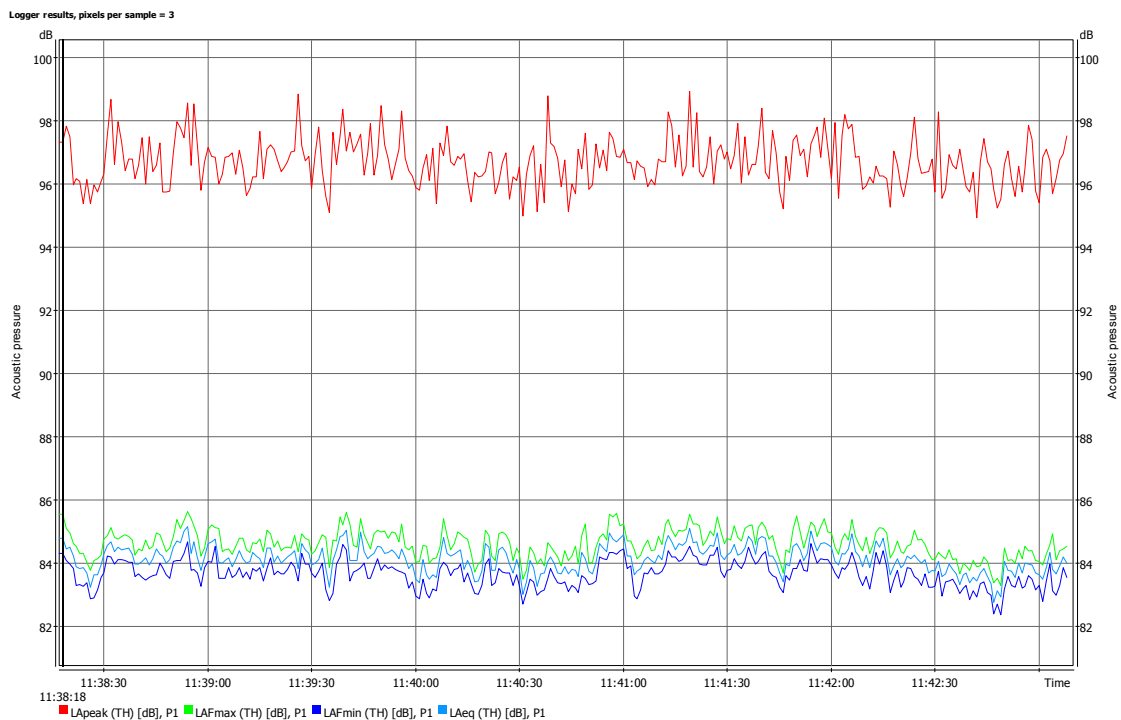


Рисунок Б.6 - РЗ шуму від шахти всмоктування повітря ГПА-25И (точка 1 на рис. 3.4 і в табл. 3.2)

Скориговані спектри РЗТ наведені на рис. Б.7: спектри відповідають масиву спектрів з РЗ, що дорівнює усередненому РЗ шуму протягом часу запису. Штриховою лінією наведені обчислені спектральні РЗТ шуму від шахти всмоктування повітря ГПА-25И для дистанції 1 м та 3 м між мікрофоном та основою

шахти всмоктування повітря (окремо результати обчислення наведені на рис. 3.14, в тому числі наведені обчислені для даного випадку ефекти впливу земної поверхні – результати інтерференції прямої та відбитої звукових хвиль від поверхні, в даному випадку – асфальтове покриття).

РЗ шуму від шахти всмоктування повітря ГПА-25И (точка 1') наведені на рис. Б.8, їх основні величини визначені і наведені в табл. Б.3. Відповідно до вимог стандарту та санітарних правил від шахти всмоктування повітря ГПА-25И слід вважати стаціонарним. Середні значення РЗ в точці 1' (табл. Б.3) на 0,3 дБА більші ніж відповідні значення для точки 1 (табл. Б.2), що є припустимим. Ця відмінність може бути обумовлена шумовим втручанням о 10:27:20 (рис. Б.8), РЗ якого на 3 дБА був вищим від усередненого значення за час спостереження (запису) акустичного сигналу в точці.

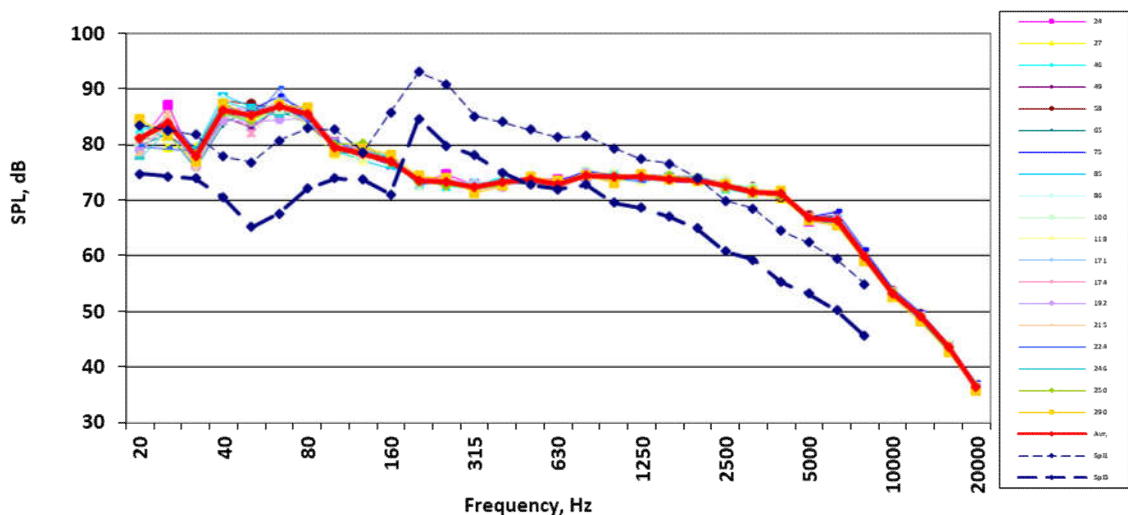


Рисунок Б.7 - Скориговані третино-октавні РЗТ шуму від шахти всмоктування повітря ГПА-25И (точка 1 на рис. 3.4 і в табл. 3.2): штриховою лінією наведені обчислені спектральні РЗТ шуму, червоною лінією наведені усереднені виміряні спектральні РЗТ шуму

Таблиця Б.3 - РЗ від шахти всмоктування повітря ГПА-25И (точка 1' на рис. 3.4 і в табл. 3.2)

Виміряна величина	$L_{Apeak}, dBA$	$L_{AE}, dBA$	$L_{AFmax}, dBA$	$L_{AFmin}, dBA$	$L_{Aeq}, dBA$
Середнє	96,92	84,42	85,08	83,79	84,42
Максимум	99,64	85,85	88,02	84,67	85,85
Мінімум	95,36	83,8	84,21	83,08	83,8
Стандартне відхилення	0,75	0,30	0,48	0,25	0,29

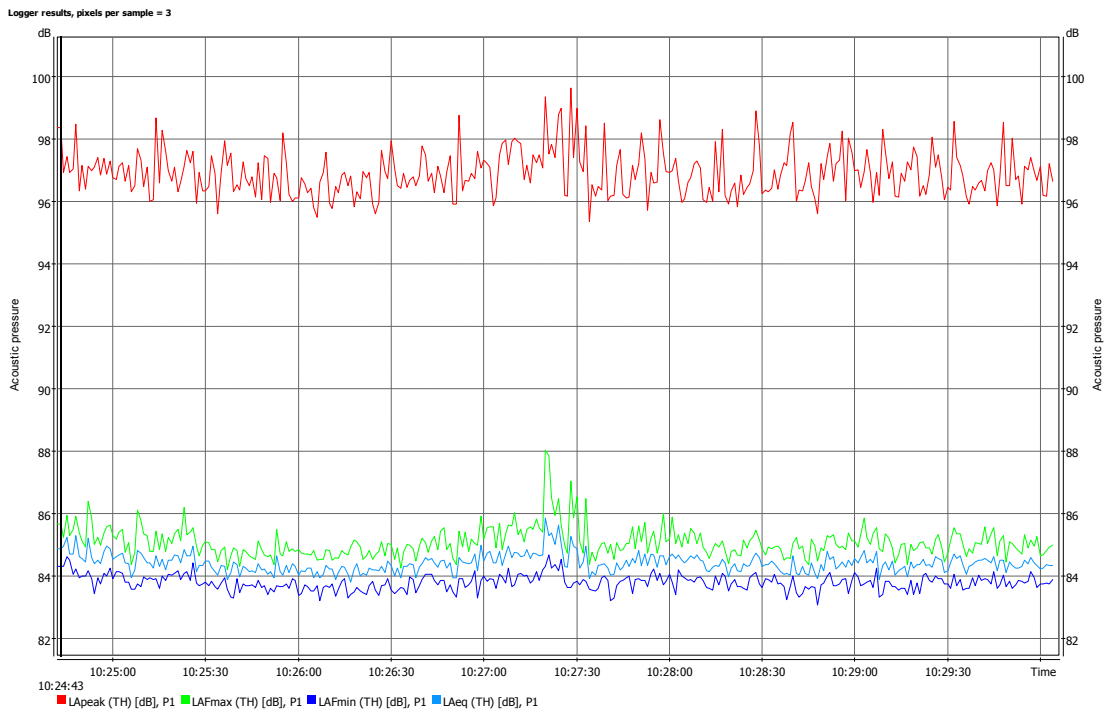


Рисунок Б.8 - РЗ шуму від шахти всмоктування повітря ГПА-25И (точка 1' на рис. 3.4 і в табл.3.2)

Скориговані спектри РЗТ наведені на рис. Б.9: спектри відповідають масиву спектрів з РЗ, що дорівнює усередненому РЗ шуму протягом часу запису. Штриховою лінією наведені обчислені спектральні РЗТ шуму від шахти всмоктування повітря ГПА-25И для дистанції 1м та 3 м між мікрофоном та основою шахти всмоктування повітря (подібно до наведених на рис. Б.7).

РЗ шуму від шахти всмоктування повітря ГПА-25И (точка 2', біля правого рогу торцевої стіни укриття) наведені на рис. Б.10, їх основні величини визначені і наведені в табл. Б.4. Відповідно до вимог стандарту та санітарних правил від шахти всмоктування повітря ГПА-25И слід вважати стаціонарним. Середні значення РЗ в точці 2' (табл. 3.6) на 0,3 дБА більші ніж відповідні значення для точки 1 (табл. Б.3), що є припустимим. Ця відмінність може бути обумовлена шумовим втручанням о 10:27:20 (рис. Б.8), РЗ якого на 3 дБА був вищим від усередненого значення за час спостереження (запису) акустичного сигналу в точці.

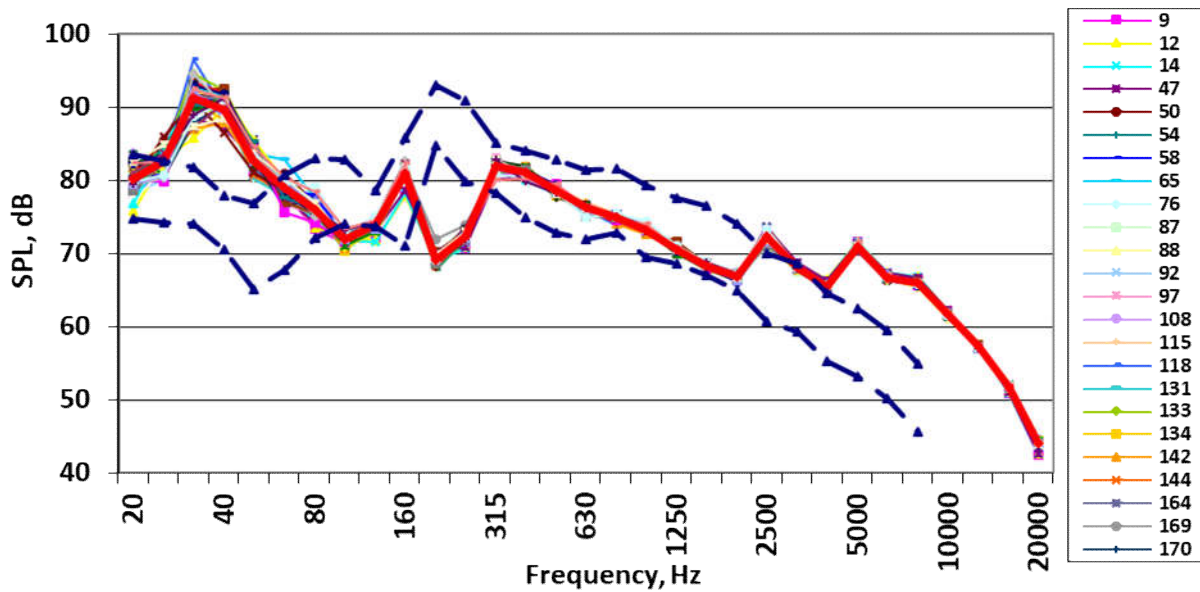


Рисунок Б.9 - Обчислені третино-октавні РЗТ шуму від шахти всмоктування повітря ГПА-25И (точка 1' на рис. 3.4 і в табл. 3.2): штриховою лінією наведені обчислені спектральні РЗТ шуму, червоною лінією наведені усереднені виміряні спектральні РЗТ шуму

Таблиця Б.4 - РЗ шуму ГТУ всередині укриття ГПА-25И (точка 2' на рис. 3.4 і в табл. 1.2)

Виміряна величина	$L_{Apeak}, dBA$	$L_{AE}, dBA$	$L_{AFmax}, dBA$	$L_{AFmin}, dBA$	$L_{Aeq}, dBA$
Середнє	96,92	84,42	85,08	83,79	84,42
Максимум	99,64	85,85	88,02	84,67	85,85
Мінімум	95,36	83,8	84,21	83,08	83,8
Стандартне відхилення	0,75	0,30	0,48	0,25	0,29

Скориговані спектри РЗТ наведені на рис. Б.11: спектри відповідають масиву спектрів з РЗ, що дорівнює усередненому РЗ шуму протягом часу запису. Штриховою лінією наведені обчислені спектральні РЗТ шуму від шахти всмоктування повітря ГПА-25И для дистанції 1 м та 3 м між мікрофоном та основою шахти всмоктування повітря (подібно до наведених на рис. Б.7).

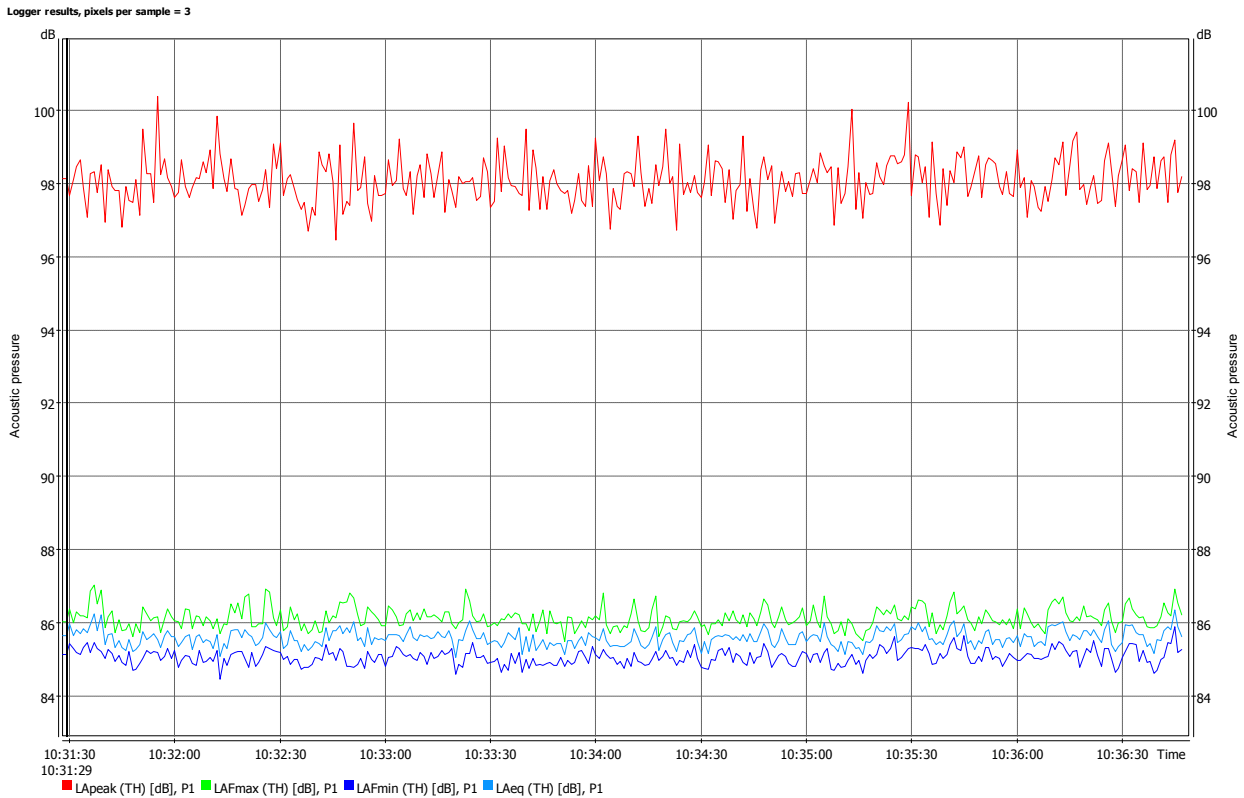


Рисунок Б.10 - РЗ шуму від шахти всмоктування повітря ГПА-25И (точка 2' на рис. 3.4 і в табл. 3.2)

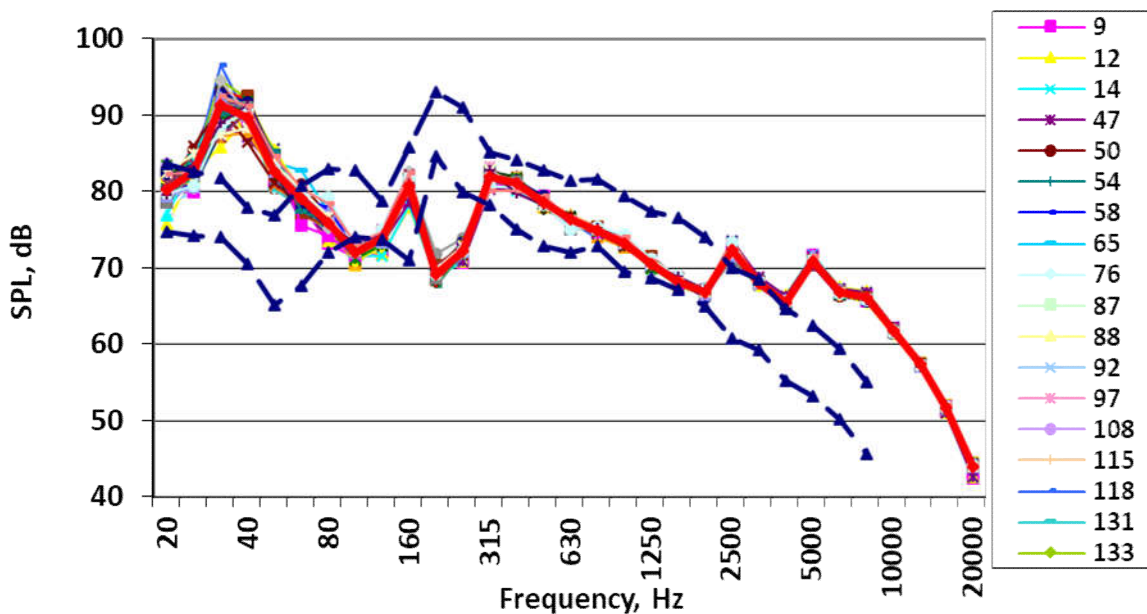


Рисунок Б.11 - Обчислені третино-октавні РЗТ шуму від шахти всмоктування повітря ГПА-25И (точка 2' на рис. 3.4 і в табл. 3.2): штриховою лінією наведені обчислені спектральні РЗТ шуму, червоною лінією наведені усереднені виміряні спектральні РЗТ шуму

РЗ шуму від шахти всмоктування повітря ГПА-25И (точка 2, біля лівого рогу торцевої стіни укриття) наведені на рис. Б.12, їх основні величини визначені і



наведені в табл. Б.5. Відповідно до вимог стандарту та санітарних правил від шахти всмоктування повітря ГПА-25И слід вважати стаціонарним. Середні значення РЗ в точці 2 (табл. Б.5) на 2,0 дБА більші ніж відповідні значення для точки 2' (табл. Б.4). Ця відмінність може бути обумовлена шумовим втручанням о 10:27:20 (рис. Б.8), РЗ якого на 3 дБА був вищим від усередненого значення за час спостереження (запису) акустичного сигналу в точці.

Таблиця Б.5 - РЗ шуму ГТУ від шахти всмоктування повітря ГПА-25И (точка 2 на рис. 3.4 і в табл. 3.2)

Виміряна величина	$L_{Apeak}, dBA$	$L_{AE}, dBA$	$L_{AFmax}, dBA$	$L_{AFmin}, dBA$	$L_{Aeq}, dBA$
Середнє	98,79	86,34	87,35	85,45	86,34
Максимум	102,8	88,62	90,57	87	88,62
Мінімум	97,27	85,26	85,92	84,58	85,26
Стандартне відхилення	0,78	0,52	0,77	0,37	0,52

Logger results, pixels per sample = 3

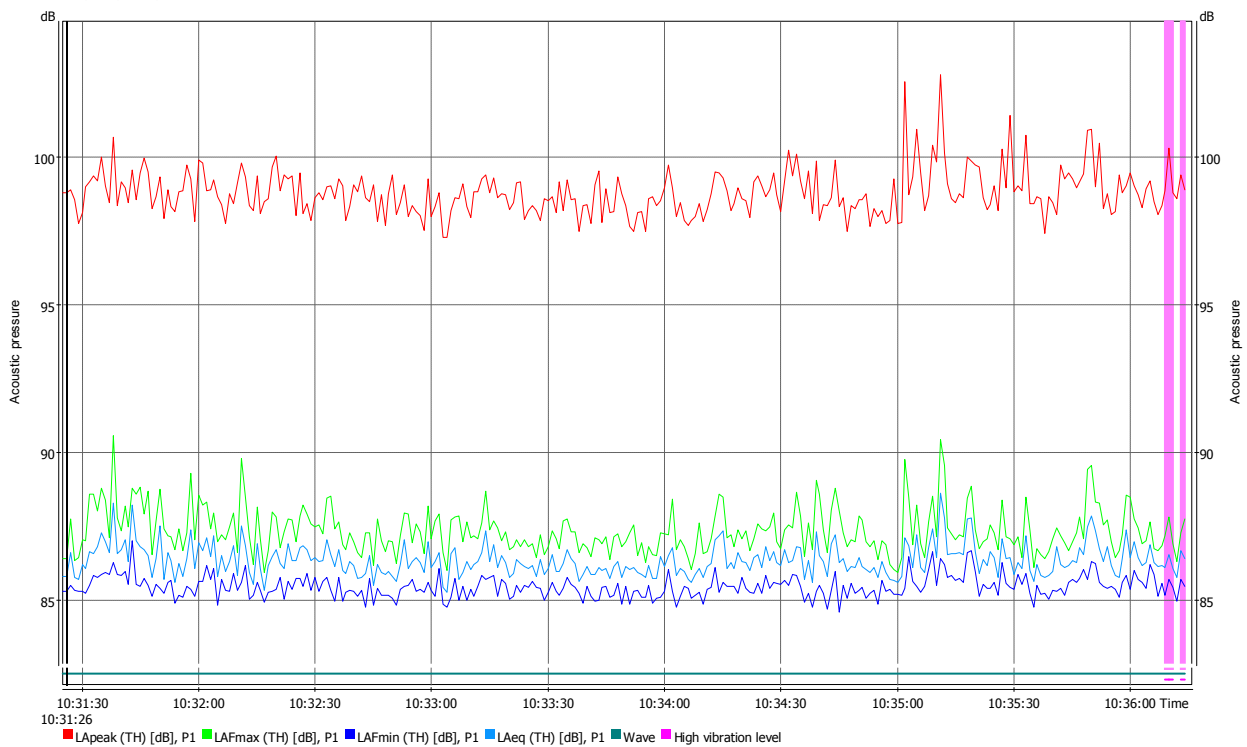


Рисунок Б.12 - РЗ шуму від шахти всмоктування повітря ГПА-25И (точка 2 на рис. 3.4 і в табл. 3.2)

Скориговані спектри РЗТ наведені на рис. Б.13: спектри відповідають масиву спектрів з РЗ, що дорівнює усередненому РЗ шуму протягом часу запису. Штриховою лінією наведені обчислені спектральні РЗТ шуму від шахти всмоктування повітря ГПА-25И для дистанції 1м та 3 м між мікрофоном та основою шахти всмоктування повітря (подібно до наведених на рис. Б.7).

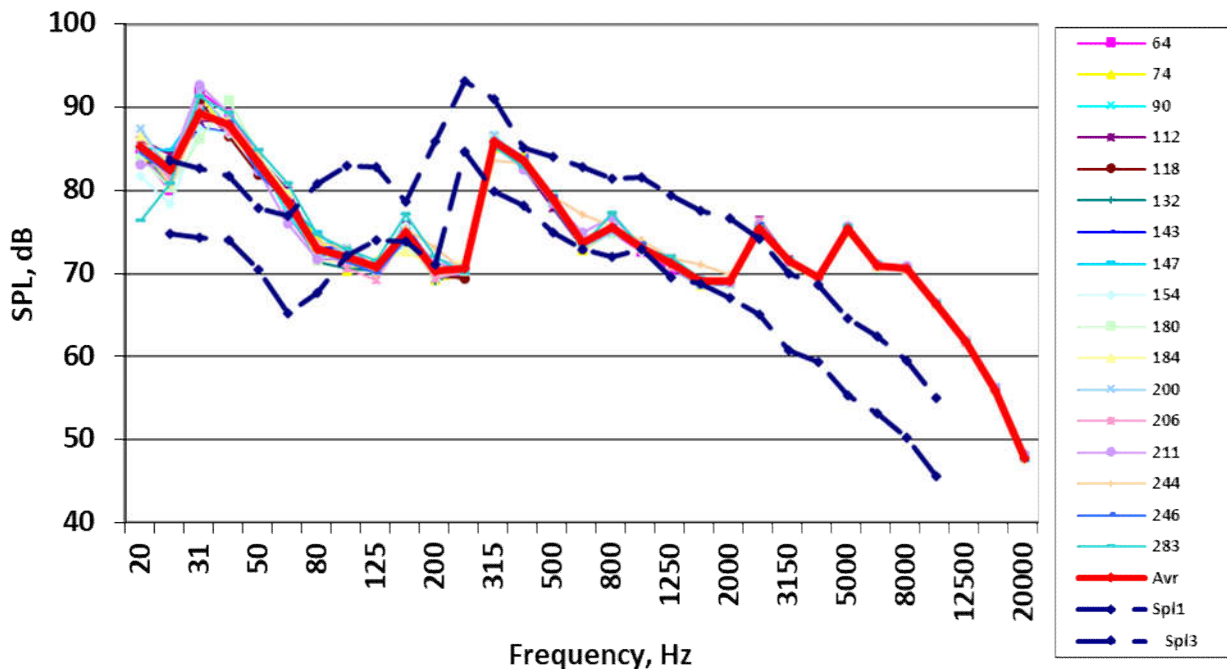


Рисунок Б.13 - Обчислені третино-октавні РЗТ шуму від шахти всмоктування повітря ГПА-25И (точка 2 на рис. 3.4 і в табл. 3.2): штриховою лінією наведені обчислені спектральні РЗТ шуму, червоною лінією наведені усереднені виміряні спектральні РЗТ шуму

### Рівні звуку від шахти витоку газів ГТУ, що відпрацювали

Рівні звуку шуму у довкіллі від шахти витоку газів ГТУ, що відпрацювали, утворюються, в основному, роботою турбіни та струменем газів з вихідного сопла ГТУ. Дане комплексне акустичне джерело є одним з провідних, тому його експериментальне дослідження з метою визначення внеску у загальне акустичне поле шуму ГПА є очевидним. Вимірювання шуму від шахти витоку газів ГТУ виконано в декількох точках 4'-11': від рогу торцевої стінки укриття і шахти всмоктування (рис. Б.14а); від бокової стіни укриття (рис. Б.14б); від рогу торцевої стінки укриття і технологічної обв'язки (рис. Б.14в).



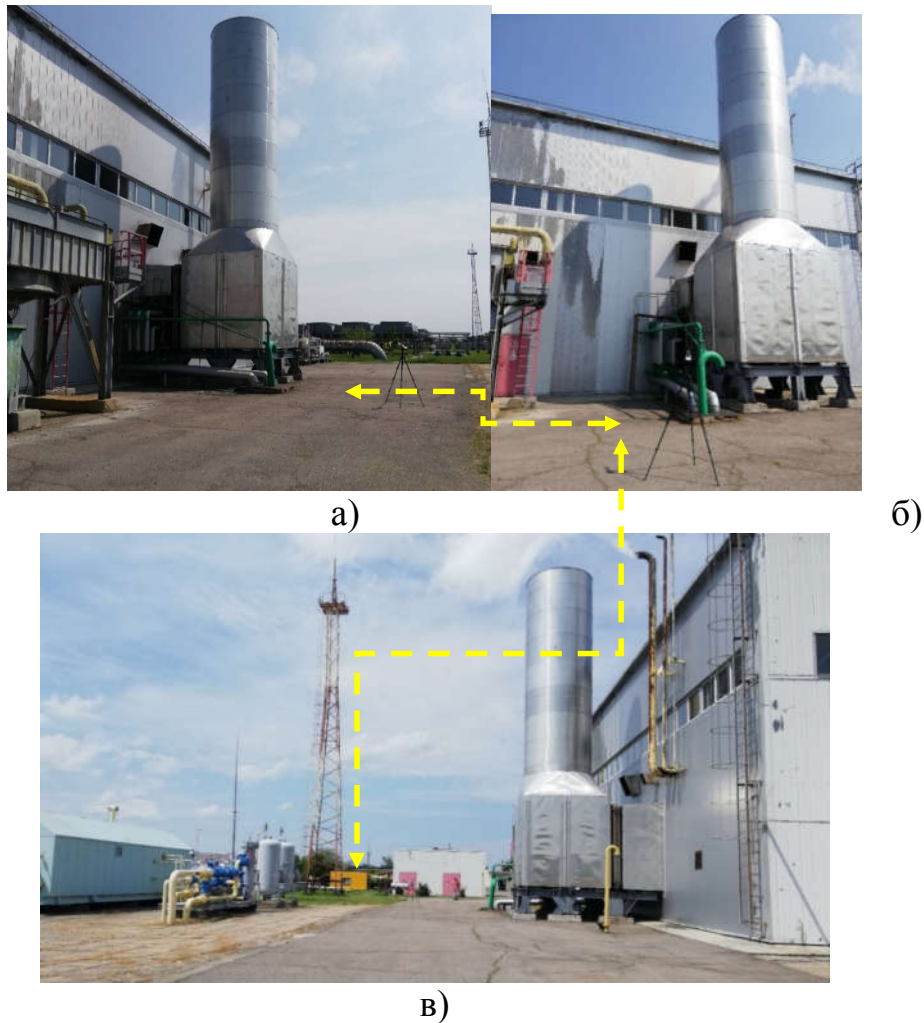


Рисунок Б.14 - Точки вимірювання шуму від шахти витоку газів КТУ, що відпрацювали(точки 4'-11'): а) вид від рогу торцевої стінки укриття і шахти всмоктування; б) вид від бокової стіни укриття; в) вид від рогу торцевої стінки укриття і технологічної обв'язки

РЗ шуму від шахти витоку газів ГПА-25И (точка 4') наведені на рис. Б.15, їх основні величини визначені і наведені в табл. Б.6. Відповідно до вимог стандарту та санітарних правил шум ГТУ слід вважати стаціонарним. Запис акустичних сигналів в точках 4' - 11' (рис. Б.15), а також в інших точках вимірювань, виконаний з включеним фільтром «А», що забезпечувало паралельне вимірювання РЗ в усіх точках. Тому у виміряні спектральні РЗТ внесені коригування в усіх смугах частот відповідно значенням фільтра «А» для цих частот.

Таблиця Б.6 - РЗ та РЗТ шуму ГТУ всередині укриття ГПА-25И (точка 4' на рис. 3.4 і в табл. 3.2)

Виміряна величина	$L_{Apeak}, dBA$	$L_{AE}, dBA$	$L_{AFmax}, dBA$	$L_{AFmin}, dBA$	$L_{Aeq}, dBA$
Середнє	97,42	84,88	85,4	84,38	84,88
Максимум	99,66	85,98	86,45	85,58	85,98
Мінімум	95,67	83,72	84,52	83,44	83,72
Стандартне відхилення	0,68	0,32	0,38	0,37	0,36

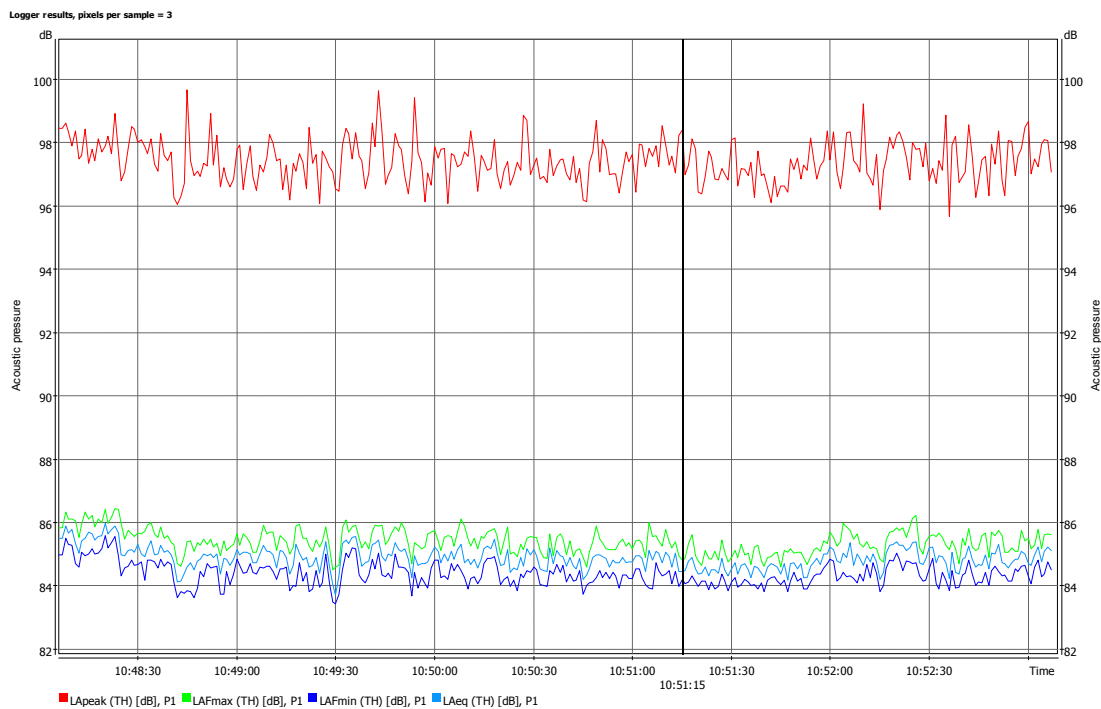


Рисунок Б.15 - РЗ шуму від шахти витоку газів ГПА-25И (точка 4' на рис. 3.4 і в табл. 3.2)

Скориговані спектри РЗТ наведені на рис. Б.16: спектри відповідають масиву спектрів з РЗ, що дорівнює усередненому РЗ шуму протягом часу запису. Штриховою лінією 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 (окремо результати обчислення наведені на рис. 3.18, в тому числі наведені обчислені для даного випадку ефекти впливу земної поверхні  $d_{later}$  – результати інтерференції прямої та відбитої звукових хвиль від земної поверхні, в даному випадку – асфальтове покриття). На рис. Б.17 наведені скориговані спектри РЗТ в точках 4'-8'.

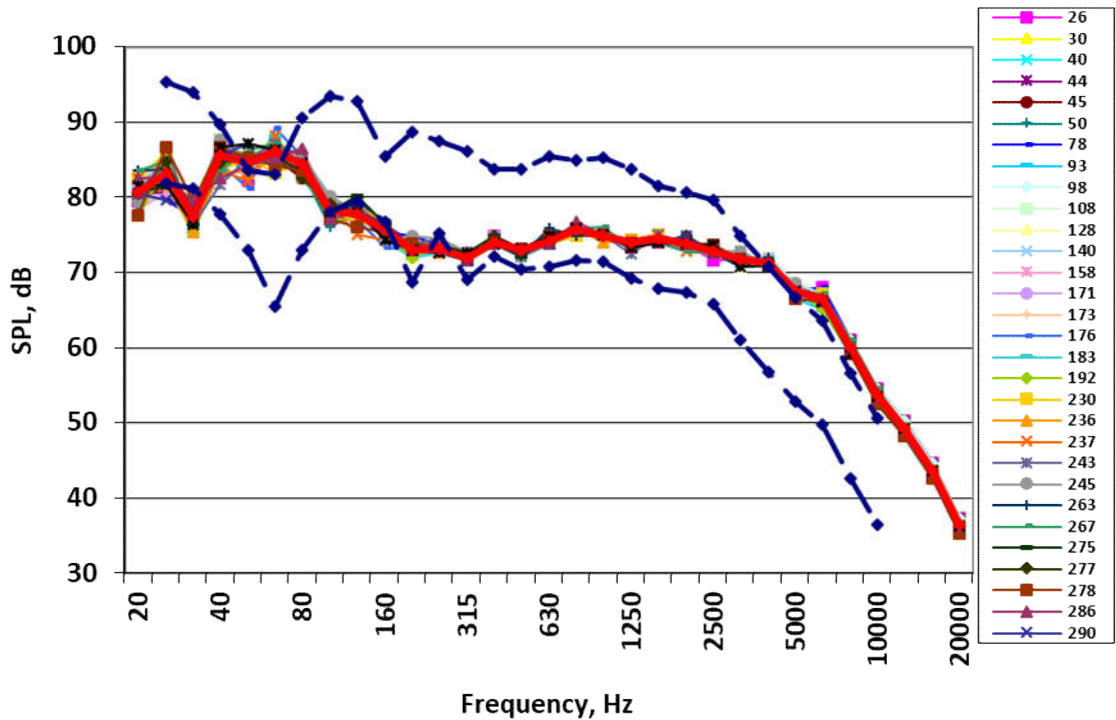


Рисунок Б.16 - Скориговані третино-октавні РЗТ шуму від шахти витоку газів ГПА-25И (точка 4' на рис. 3.4 і в табл. 3.2): штриховою лінією наведені обчислені спектральні РЗТ шуму, червоною лінією наведені усереднені виміряні спектральні РЗТ шуму

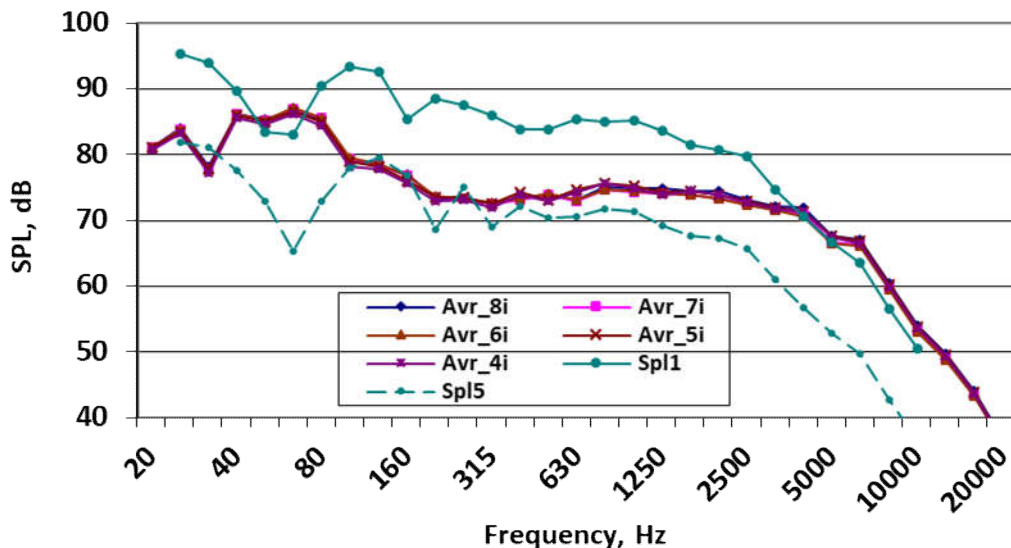


Рисунок Б.17 - Скориговані третино-октавні РЗТ шуму від шахти витоку газів ГПА-25И (точка 4'-8' на рис. 3.4 і в табл. 3.2): штриховою лінією наведені обчислені спектральні РЗТ шуму, червоною лінією наведені усереднені виміряні спектральні РЗТ шуму

### Рівні звуку від технологічної обв'язки нагнітача

Рівні звуку шуму у довкіллі від технологічної обв'язки нагнітача, утворюються, в основному, роботою центробіжного компресора нагнітача. Дане комплексне (нагнітач та газопроводи) акустичне джерело відноситься до провідних джерел шуму ГПА у цілому. Тому його експериментальне дослідження (в натурних умовах) з метою визначення внеску у загальне акустичне поле шуму ГПА є очевидним. Вимірювання шуму від технологічної обв'язки нагнітача виконано в декількох точках: 10 – з торця укриття і технологічної обв'язки (рис. Б.18а), та біля рогу торцевої стіни укриття – 11 (рис. Б.18б).



а)

б)

Рисунок Б.18 - Точки вимірювання шуму від технологічної обв'язки нагнітача: а) вид з торця укриття; б) вид від бокової стіни укриття

РЗ шуму від технологічної обв'язки нагнітача ГПА-25И (точка 10) наведені на рис. Б.19, їх основні величини визначені і наведені в табл. Б.7. Відповідно до вимог стандарту та санітарних правил шум ГТУ слід вважати стаціонарним. Скориговані спектри РЗТ наведені на рис. Б.20: спектри відповідають масиву спектрів з РЗ, що дорівнює усередненому РЗ шуму протягом часу запису.

Таблиця Б.7 - РЗ шуму від технологічної обв'язки нагнітача ГПА-25И (точка 10 на рис. 3.4 і в табл. 3.2)

Виміряна величина	$L_{Apeak}, dBA$	$L_{AE}, dBA$	$L_{AFmax}, dBA$	$L_{AFmin}, dBA$	$L_{Aeq}, dBA$
Середнє	96,02	83,57	84,04	83,11	83,57
Максимум	99,38	85,22	86,29	84,07	85,22
Мінімум	92,63	80,85	81,3	80,19	80,85
Стандартне відхилення	1,1	0,88	0,89	0,9	0,88

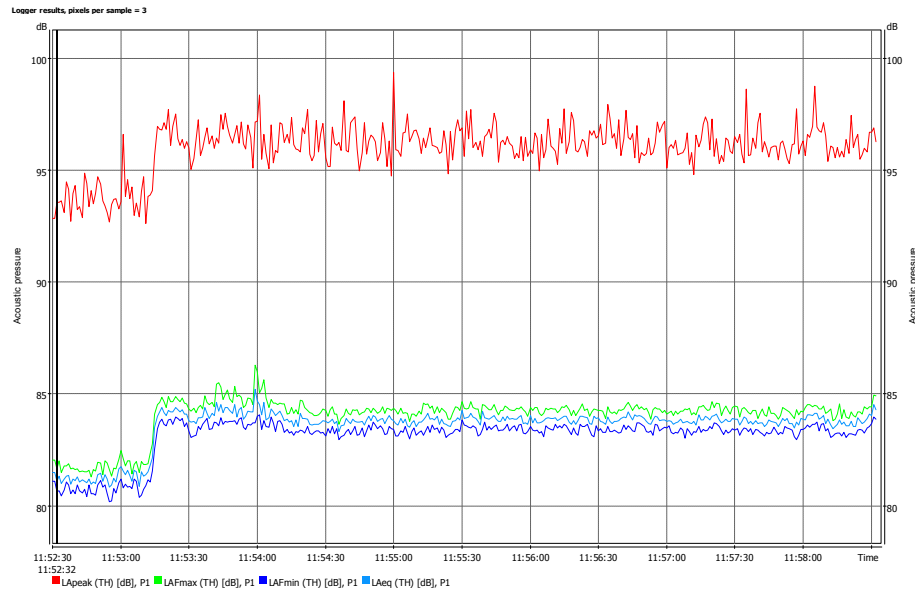


Рисунок Б.19 - РЗ шуму від технологічної обв'язки нагнітача ГПА-25И (точка 10 на рис. 3.4 і в табл. 3.2)

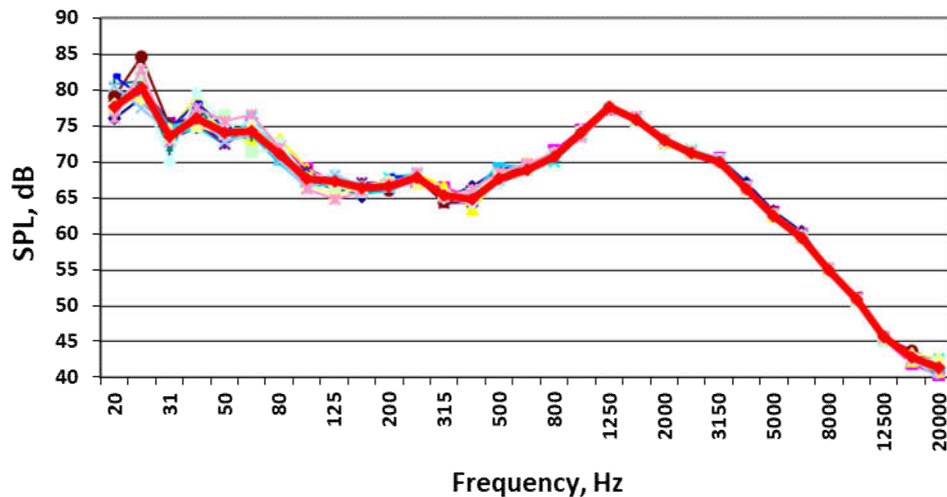


Рисунок Б.20 - Скориговані третино-октавні РЗТ шуму технологічної обв'язки нагнітача ГПА-25И (точка 10 на рис. 3.4 і в табл. 3.2): червоною лінією наведені усереднені виміряні спектральні РЗТ шуму

### Вимірювання рівнів звуку від ГПА у цілому

Рівні звуку та РЗТ шуму у довкіллі від ГПА у цілому, які утворюються роботою усіх домінуючих джерел ГПА виконані на території КС і поза нею. Його експериментальне дослідження (в натурних умовах) 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. Вимірювання шуму від ГПА у цілому



виконано в декількох точках 5-9 (рис. Б.21). Вид поверхні, що відбиває звукові промені, в усіх точках був різним.

РЗ шуму на відстані 50м від шахти витоку газів ГПА-25И (точки 11 та 5) і біля 30 м від центру технологічної обв'язки нагнітача наведені на рис. Б.22 та в табл. Б.8. Відповідно до вимог стандарту та санітарних правил шум ГТУ слід вважати стаціонарним. Різниця в усереднених результатах для РЗ між точками 0,3-0,5 дБА, тому точки можна вважати подібними.



а)

б)



в)



г)



д)

Рисунок Б.21 - Точки вимірювання шуму від ГПА у цілому: а) точка 5; б) точка 6; в) точка 7; г) точка 9; д) точка 8



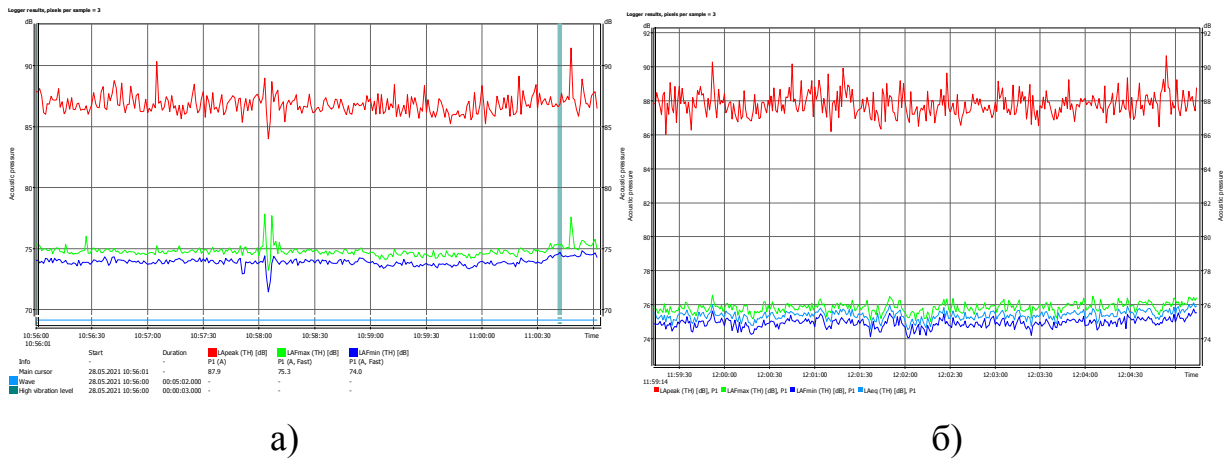


Рисунок Б.22 - РЗ шуму на відстані 50м від шахти витоку газів ГПА-25И (точки 11 та 5 на рис. 1.4 і в табл. 3.2) і біля 30 м від центру технологічної обв'язки нагнітача:

а) точка 11; б) точка 5

Таблиця Б.8 - РЗ та РЗТ шуму на відстані 50 м від ГПА-25И (точки 11 і 5 на рис. 3.4 і в табл. 3.2)

Виміряна величина	$L_{Apeak}, dBA$	$L_{AE}, dBA$	$L_{AFmax}, dBA$	$L_{AFmin}, dBA$	$L_{Aeq}, dBA$
Середнє (точки 11/5)	87,81/ 87,86	75,38/ 74,81	75,85/ 75,3	74,93/ 74,04	75,38/ 74,81
Максимум	90,64	76,13	76,58	75,75	76,13
Мінімум	86,02	74,54	75,01	74,07	74,54
Стандартне відхилення	0,69	0,26	0,27	0,27	0,26

Запис акустичних сигналів в точках 5 і 11 (рис. Б.22), а також в інших точках вимірювань, виконаний з включеним фільтром «А», що забезпечувало паралельне вимірювання РЗ в усіх точках. Тому у виміряні спектральні РЗТ внесені коригування в усіх смугах частот відповідно значенням фільтра «А» для цих частот. Скориговані спектри РЗТ в точках 5 і 11 наведені на рис. Б.23 і Б.24: спектри відповідають масиву спектрів з РЗ, що дорівнює усередненому РЗ шуму протягом часу запису.

На рис. Б.25 наведені обчислені спектральні РЗТ шуму від технологічної обв'язки нагнітача ГПА-25И для дистанції 1 – 10 м між мікрофоном та точкою 10. Розбіжність вимірних та обчислених результатів доволі висока, дана точка потребує уточнення в координатах та функціональному призначенні об'єкту.



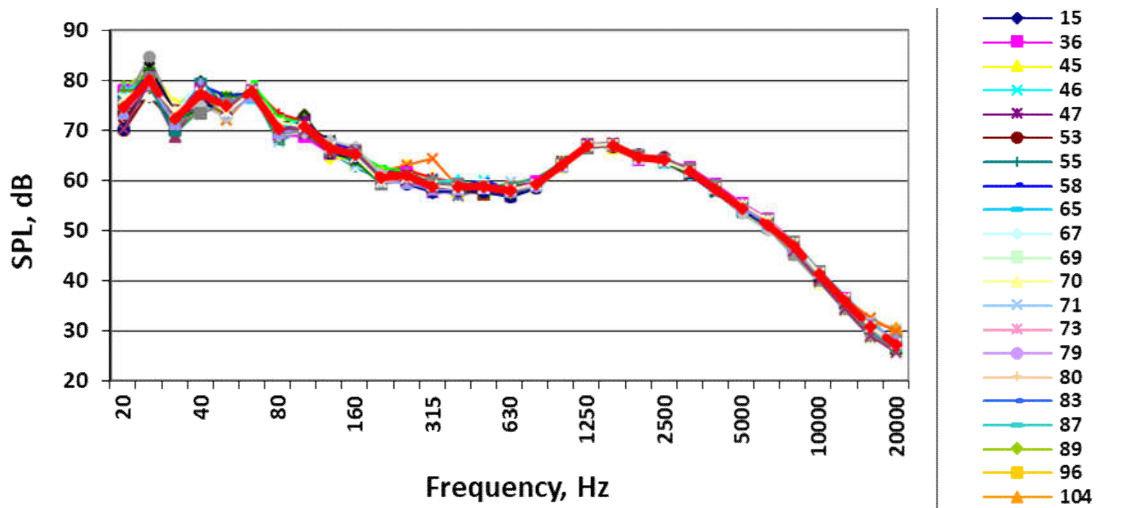


Рисунок Б.23 - Скориговані третино-октавні РЗТ шуму в точці 5 біля ГПА-25И (точка 5 на рис. 3.4 і в табл. 3.2): червоною лінією наведені усереднені виміряні спектральні РЗТ шуму

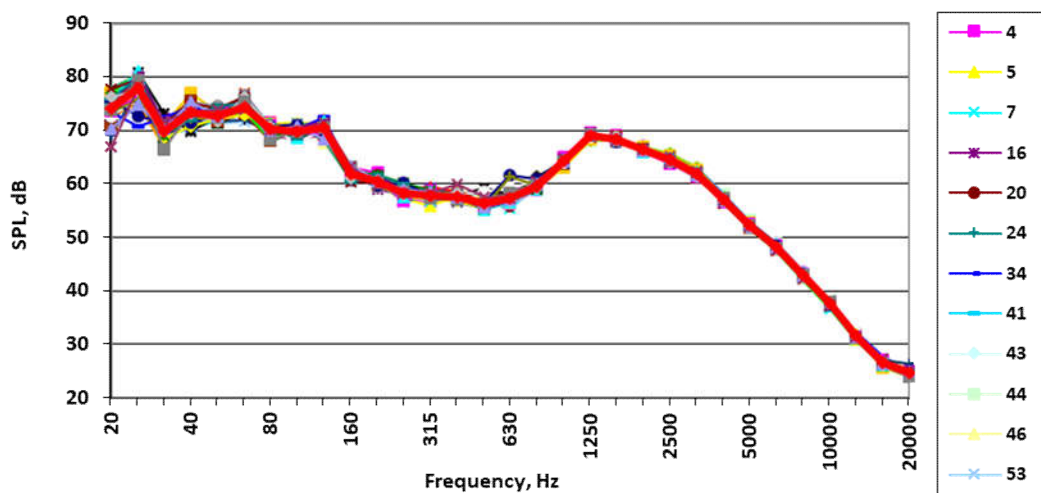


Рисунок Б.24 - Скориговані третино-октавні РЗТ шуму в точці 11 біля ГПА-25И (точка 11 на рис. 3.4 і в табл. 3.2): червоною лінією наведені усереднені виміряні спектральні РЗТ шуму

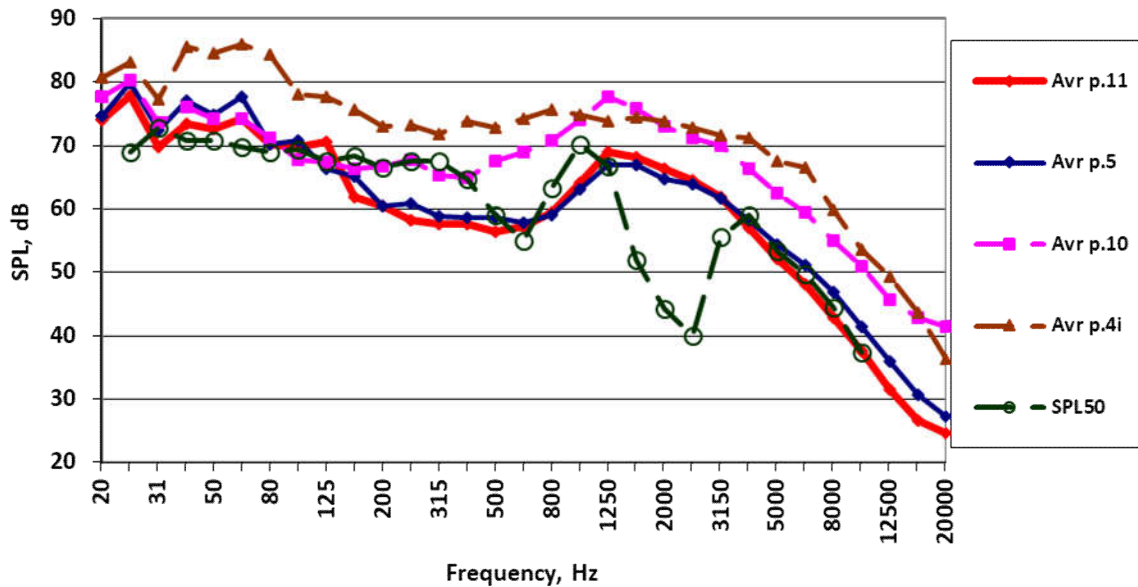


Рисунок Б.25 - Порівняння усереднених третино-октавних спектрів РЗТ шуму в точці 11 і 5 біля ГПА-25И зі спектрами акустичних джерел технологічної обв'язки нагнітача (точка 10) та шахти витоку газів (точка 4'): пунктирною лінією наведені обчислений спектр РЗТ шуму для ГПА-25И у цілому (потужність випромінювання з табл. 3.2)

На рис. Б.25 наведено порівняння усереднених третино-октавних спектрів РЗТ шуму в точках 11 і 5 біля ГПА-25И зі спектрами акустичних джерел технологічної обв'язки нагнітача (точка 10) та шахти витоку газів (точка 4') – в смугах середніх та високих частот спектри РЗТ в точках 11 і 5 більше подібні до спектру шуму технологічної обв'язки нагнітача (точка 10), а в смугах низьких частот – до спектру шуму шахти витоку газів (точка 4'). Розбіжність вимірних та обчислених результатів (для ГПА-25И у цілому) доволі висока, дана точка потребує уточнення в координатах та функціональному призначенні об'єкту.

РЗ шуму на відстані 350м від шахти витоку газів ГПА-25И (точки 8) наведені на рис. Б.26 та в табл. Б.9. На інтервалі 11:26:30 - 11:27:00 сталася звукова подія з РЗ на 25-30 дБА від фонового шуму в точці. З подальшого аналізу даний інтервал вилучений.

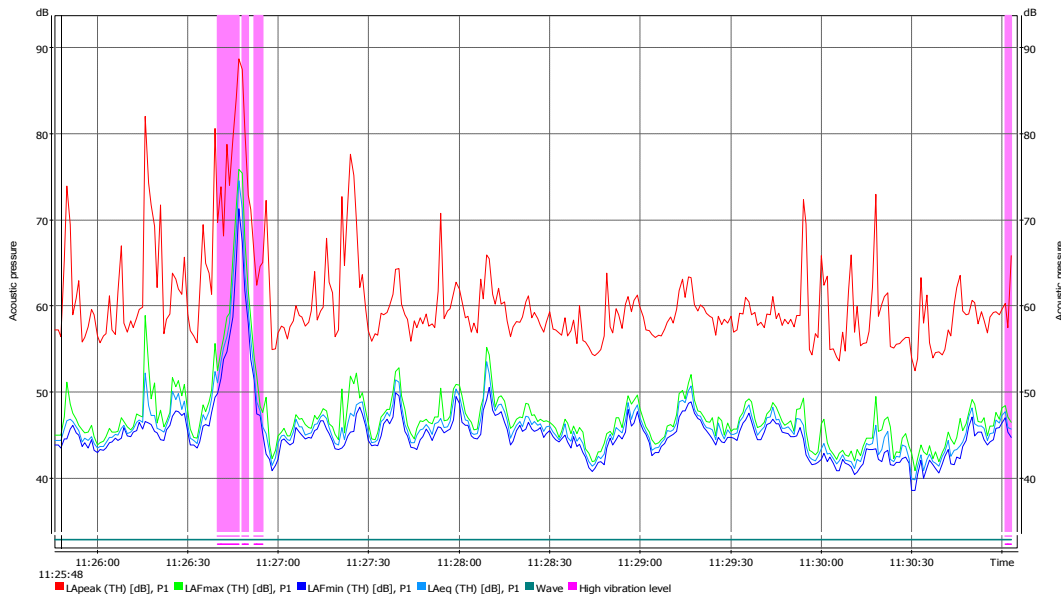


Рисунок Б.26 - РЗ шуму на відстані 350м від шахти витоку газів ГПА-25И (точка 8 на рис. 3.4 і в табл. 3.2)

Таблиця Б.9 - РЗ шуму на відстані 350 м від ГПА-25И (точка 8 на рис. 3.4 і в табл. 3.2)

Виміряна величина	$L_{Apeak}, dBA$	$L_{AE}, dBA$	$L_{AFmax}, dBA$	$L_{AFmin}, dBA$	$L_{Aeq}, dBA$
Середнє	59,36	45,57	46,55	44,54	45,47
Максимум	88,76	78,46	75,87	50,57	53,49
Мінімум	52,5	39,8	40,84	38,54	39,8
Стандартне відхилення	4,17	3,07	3,04	2,13	2,29

Запис акустичних сигналів в точці 8 (рис. Б.26), а також в інших точках вимірювань, виконаний з включеним фільтром «А», що забезпечувало паралельне вимірювання РЗ в усіх точках. Тому у виміряні спектральні РЗТ внесені коригування в усіх смугах частот відповідно значенням фільтра «А» для цих частот. Скориговані спектри РЗТ наведені на рис. Б.27: спектри відповідають масиву спектрів з РЗ, що дорівнює усередненому РЗ шуму протягом часу запису. З аналізу вилучений інтервал 11:26:30 - 11:27:00, коли сталася звукова подія з РЗ на 25-30 дБА вищими від фонового шуму в точці (рис. Б.26).

РЗ шуму на відстані 150м від шахти витоку газів ГПА-25И (точка 7) наведені на рис. Б.28 та в табл. Б.10. На інтервалі 11:14:00 - 11:15:00 сталася звукова подія з РЗ на 15-20 дБА від фонового шуму в точці. З подальшого аналізу даний інтервал вилучений.

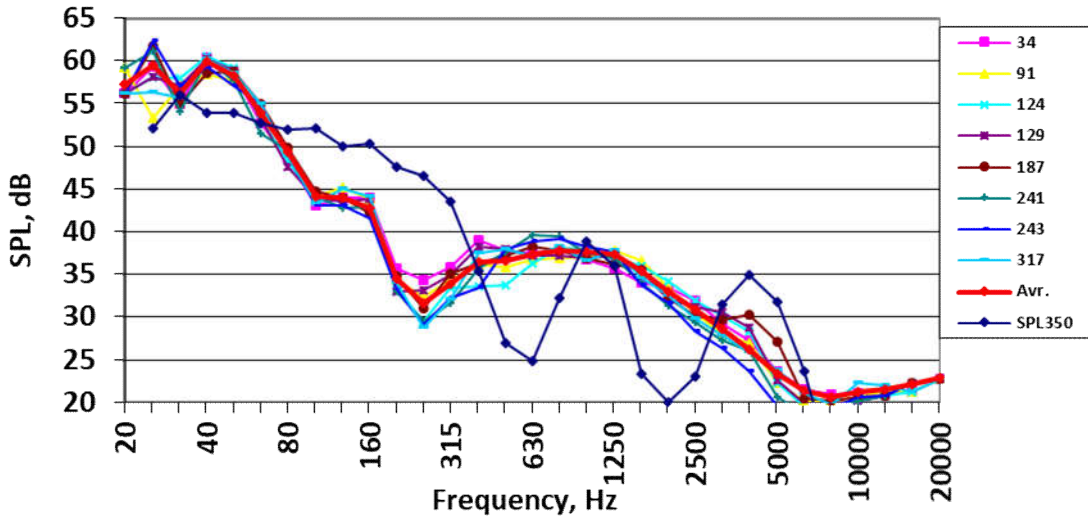


Рисунок Б.27 - Скориговані третино-октавні РЗТ шуму на відстані 350 м від ГПА-25И (точка 8 на рис. 3.4 і в табл. 3.2): червоною лінією наведені усереднені вимірні спектральні РЗТ шуму

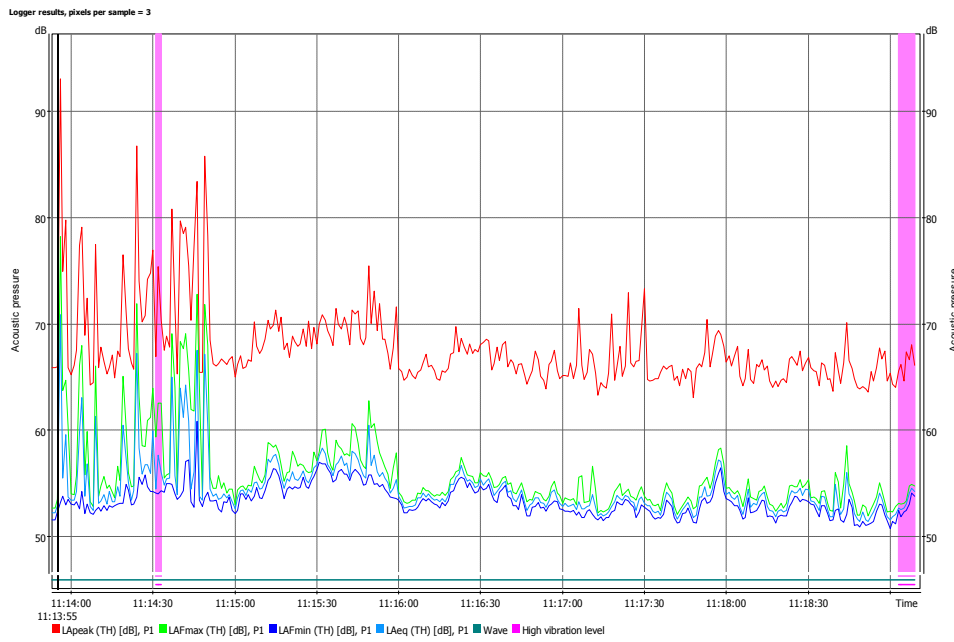


Рисунок Б.28 - РЗ шуму на відстані 150м від шахти витоків газів ГПА-25И (точка 7 на рис. 3.4 і в табл. 3.2)

Таблиця Б.10 - РЗ шуму на відстані 150 м від ГПА-25И (точка 7 на рис. 3.4 і в табл. 3.2)

Виміряна величина	$L_{Apeak}, dBA$	$L_{AE}, dBA$	$L_{AFmax}, dBA$	$L_{AFmin}, dBA$	$L_{Aeq}, dBA$
Середнє	66,78	54,02	54,85	53,30	54,02
Максимум	75,47	60,44	62,8	56,96	60,44
Мінімум	63,04	51,41	51,94	50,72	51,41
Стандартне відхилення	2,08	1,58	1,90	1,39	1,58

Запис акустичних сигналів в точці 7 (рис. Б.28), а також в інших точках вимірювань, виконаний з включеним фільтром «А», що забезпечувало паралельне вимірювання РЗ в усіх точках. Тому у виміряні спектральні РЗТ внесені коригування в усіх смугах частот відповідно значенням фільтра «А» для цих частот. Скориговані спектри РЗТ наведені на рис. Б.29: спектри відповідають масиву спектрів з РЗ, що дорівнює усередненому РЗ шуму протягом часу запису. З аналізу вилучений інтервал 11:14:00 - 11:15:00, коли сталася звукова подія з РЗ на 15-20 дБА вищими від фонового шуму в точці (рис. Б.28).

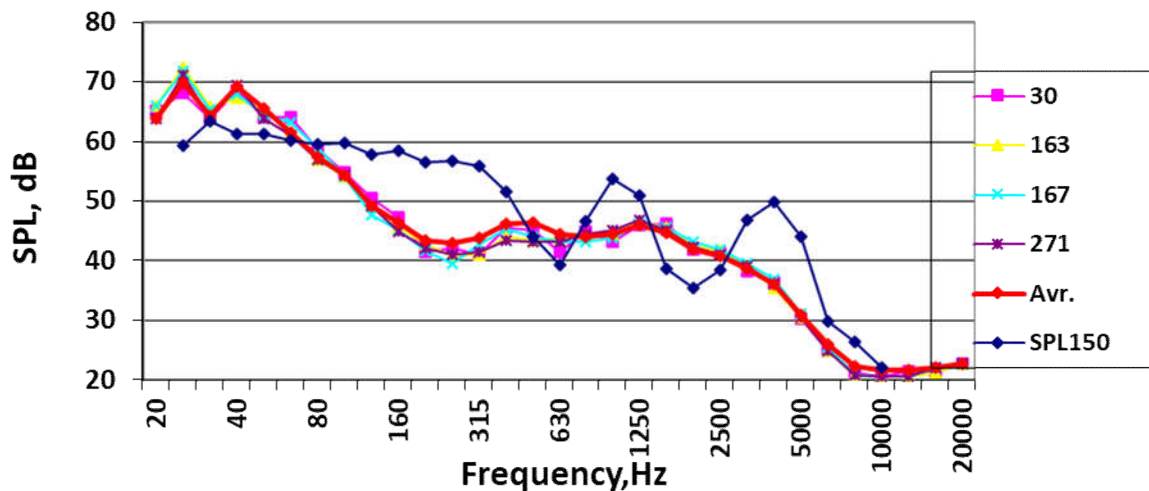


Рисунок Б.29 - Скориговані третино-октавні РЗТ шуму на відстані 150 м від ГПА-25И (точка 7 на рис. 3.4 і в табл. 3.2): червоною лінією наведені усереднені виміряні спектральні РЗТ шуму

РЗ та РЗТ шуму на відстані 125м від шахти витоку газів ГПА-25И (точка 6) наведені на рис. Б.30 та в табл. Б.11. На інтервалі 11:14:00 - 11:15:00 сталася звукова подія з РЗ на 15-20 дБА від фонового шуму в точці. З подальшого аналізу даний інтервал вилучений.

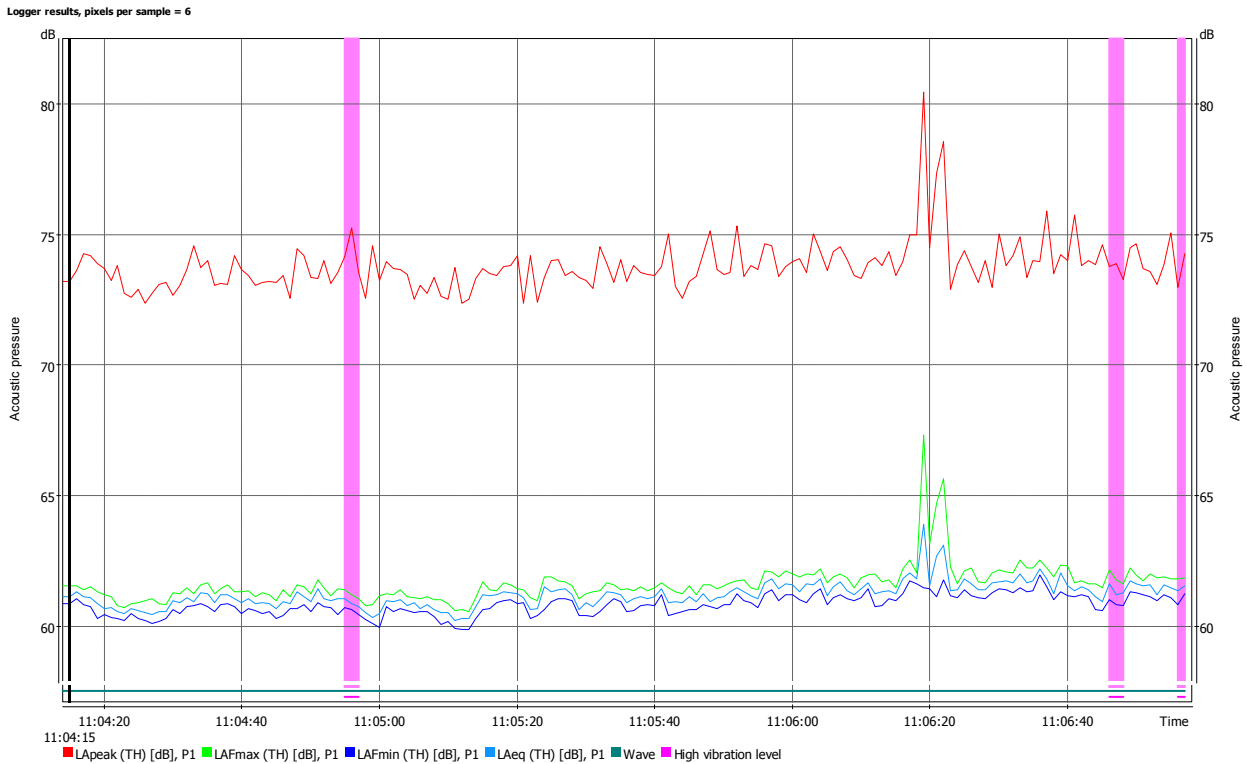


Рисунок Б.30 - РЗ шуму на відстані 125м від шахти витоків газів ГПА-25И (точка 7 на рис. 3.4 і в табл. 3.2)

Таблиця Б.11 - РЗ шуму на відстані 125 м від ГПА-25И (точка 6 на рис. 1.4 і в табл. 1.2)

Виміряна величина	$L_{Apeak}, dBA$	$L_{AE}, dBA$	$L_{AFmax}, dBA$	$L_{AFmin}, dBA$	$L_{Aeq}, dBA$
Середнє	73,80	61,21	61,64	60,83	61,21
Максимум	80,47	63,9	67,31	61,98	63,9
Мінімум	72,36	60,23	60,58	59,87	60,23
Стандартне відхилення	0,99	0,49	0,75	0,40	0,49

Запис акустичних сигналів в точці 6 (рис. Б.30), а також в інших точках вимірювань, виконаний з включеним фільтром «А», що забезпечувало паралельне вимірювання РЗ в усіх точках. Тому у виміряні спектральні РЗТ внесені коригування в усіх смугах частот відповідно значенням фільтра «А» для цих частот. Скориговані спектри РЗТ наведені на рис. Б.31: спектри відповідають масиву спектрів з РЗ, що дорівнює усередненому РЗ шуму протягом часу запису. З аналізу вилучений інтервал 11:14:00 - 11:15:00, коли сталася звукова подія з РЗ на 15-20 дБА вищими від фонового шуму в точці (рис. Б.31).

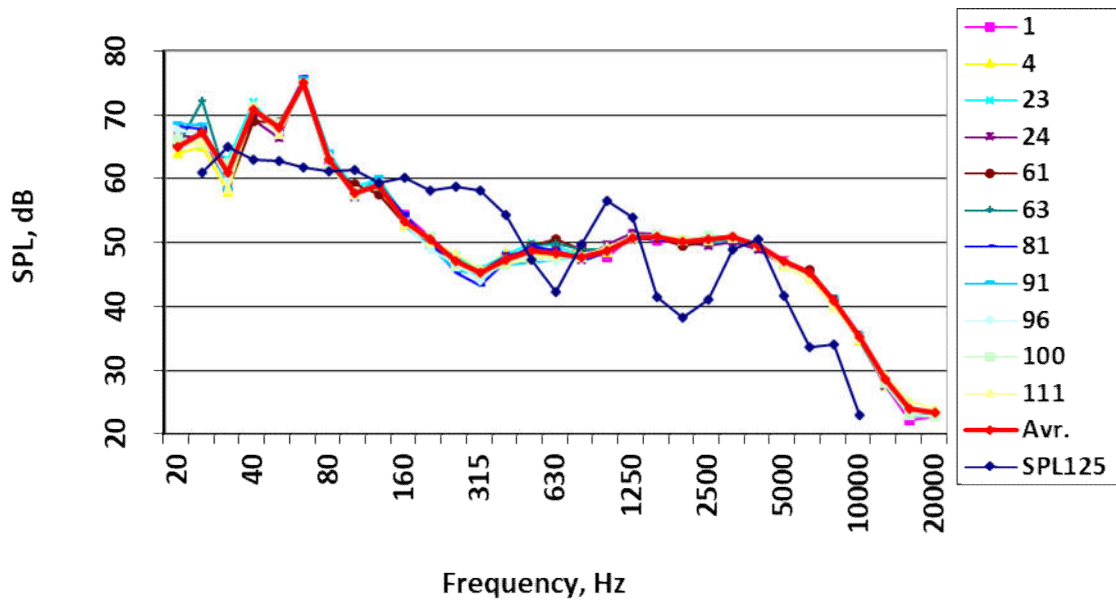


Рисунок Б.31 - Скориговані третино-октавні РЗТ шуму на відстані 125 м від ГПА-25И (точка 6 на рис. 3.4 і в табл. 3.2): червоною лінією наведені усереднені вимірні спектральні РЗТ шуму

РЗ шуму на відстані 480 м від шахти витоку газів ГПА-25И (точка 9) наведені на рис. Б.32 та в табл. Б.12. На інтервалах 11:38:00 - 11:38:30, 11:40:30 - 11:41:00 і 11:43:00 - 11:44:00 сталися звукові події з РЗ на 15-20 дБА від фонового шуму в точці. З подальшого аналізу дані інтервали вилучені.

Запис акустичних сигналів в точці 9 (рис. Б.32), а також в інших точках вимірювань, виконаний з включеним фільтром «А», що забезпечувало паралельне вимірювання РЗ в усіх точках. Тому у вимірні спектральні РЗТ внесені коригування в усіх смугах частот відповідно значенням фільтра «А» для цих частот. Скориговані спектри РЗТ наведені на рис. Б.33: спектри відповідають масиву спектрів з РЗ, що дорівнює усередненому РЗ шуму протягом часу запису. З аналізу вилучені інтервали 11:38:00 - 11:38:30, 11:40:30 - 11:41:00 і 11:43:00 - 11:44:00, коли сталися звукові події з РЗ на 15-20 дБА вищими від фонового шуму в точці (рис. Б.32).

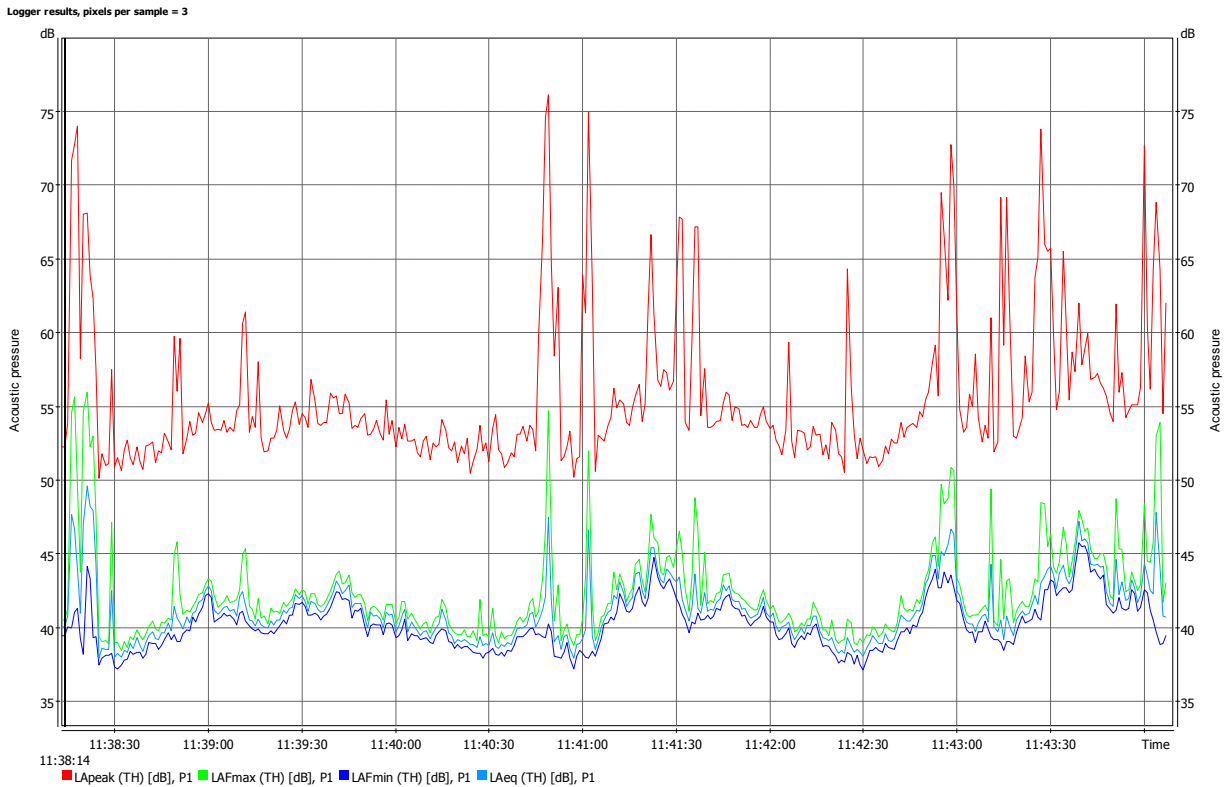


Рисунок Б.32 - РЗ шуму на відстані 480 м від шахти витоку газів ГПА-25И (точка 9 на рис. 3.4 і в табл. 3.2)

Таблиця Б.12 - РЗ шуму на відстані 480 м від ГПА-25И (точка 9 на рис. 3.4 і в табл. 3.2)

Виміряна величина	$L_{Apeak}, dBA$	$L_{AE}, dBA$	$L_{AFmax}, dBA$	$L_{AFmin}, dBA$	$L_{Aeq}, dBA$
Середнє	54,42	40,88	41,73	40,18	40,88
Максимум	74,93	46,64	51,96	44,75	46,64
Мінімум	50,44	38	38,5	37,16	38
Стандартне відхилення	3,45	1,98	1,44	1,48	1,56



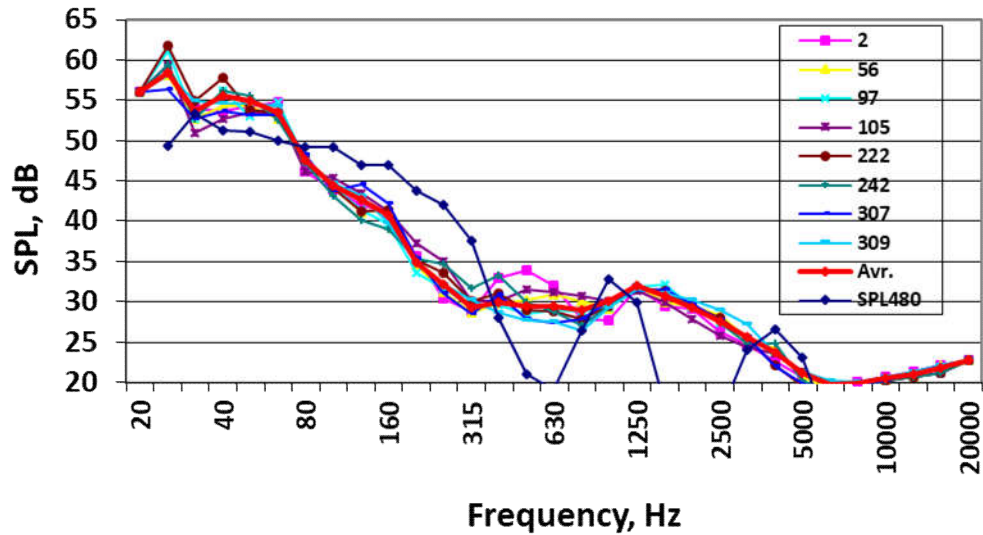


Рисунок Б.33 - Скориговані третино-октавні РЗТ шуму на відстані 480 м від ГПА-25И (точка 9 на рис. 3.4 і в табл. 3.2): червоною лінією наведені усереднені вимірні спектральні РЗТ шуму

На рис. Б.34 наведено порівняння усереднених третино-октавних спектрів РЗТ шуму в точках 5, 11, 6, 7, 8 і 9 на відстані 50-480 м від шахти витоку газів ГПА-25И зі спектрами шуму акустичних джерел технологічної обв'язки нагнітача (точка 10) та (точка 4') – крім впливу ефекту поширення звуку від точкового джерела ( $-20\lg R$ ) і ефекту поглинання звуку в атмосферному повітрі ( $-\alpha R$ ) очевидним є вплив ефекту земної поверхні в смугах середніх та високих частот.

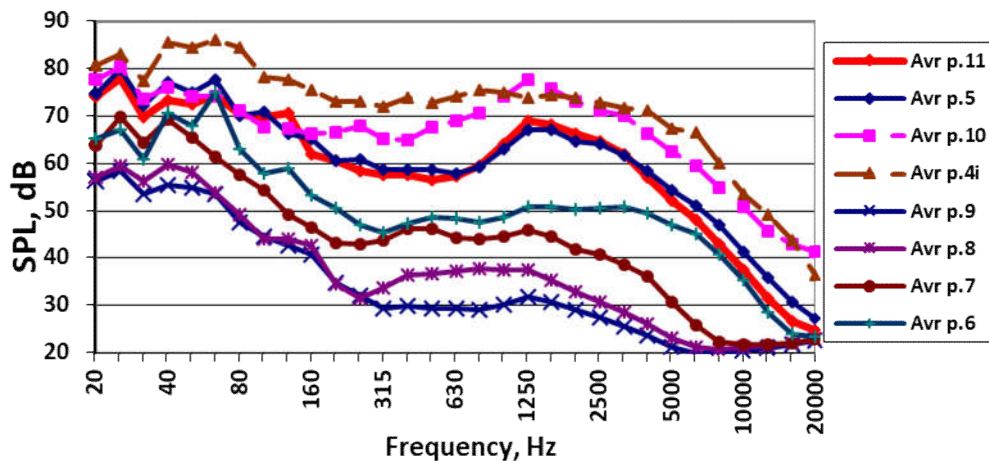


Рисунок Б.34 - Порівняння усереднених третино-октавних спектрів РЗТ шуму в точках 5, 11, 6, 7, 8 і 9 на відстані 50-480 м від шахти витоку газів ГПА-25И зі спектрами шуму акустичних джерел технологічної обв'язки нагнітача (точка 10) та (точка 4')



ДЕРЖАВНИЙ КОНЦЕРН «УКРОБОРОНПРОМ»



ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «ЗАВОД 410 ЦА»  
State Enterprise Plant 410 Civil Aviation

Україна, 03151, Київ-151, Повітрофлотський пр., 94  
aviamark@410.kiev.ua

тел. : (44) 246-99-26, факс: (44) 246-99-83

94, Povitroflotskiy ave., Kiev, 03151, Ukraine  
arp410@410.kiev.ua

№ 45.2-1055/1  
25.03.2021р.

### АКТ

впровадження результатів науково-дослідної роботи  
Карпенка Сергія Володимировича щодо нормалізації впливу на довкілля шуму  
та викидів забруднюючих речовин компресорних станцій магістральних  
газопроводів

Комісія ДЕРЖАВНОГО ПІДПРИЄМСТВА «ЗАВОД 410 ЦА», у складі голови комісії – Генерального директора Пащенко О. Ю. та членів комісії: Директора технічного Жигинаса В. В., Головного конструктора Кіпрова О.В., Головного контролера – начальника ВТК Любченка С.А., констатує, що дисертаційна робота аспіранта Національного авіаційного університету с.н.с. Карпенка С.В. що присвячена нормалізації впливу на довкілля шуму та викидів забруднюючих речовин компресорних станцій магістральних газопроводів представляє великий практичний інтерес фахівців ДП «ЗАВОД 410 ЦА».

Комісія підтверджує, що наукові положення та висновки по дисертаційній роботі Карпенка С.В., зокрема метод очищення гранулами льоду лопаток газотурбінних установок при виконанні технічних проектів по ремонту авіаційної техніки, а саме авіаційних турбін.

Практичне використання знайшли запропоновані Карпенко С.В. методи очистки авіаційних турбін під час проведення ремонтних робіт двигуна типу





Д-36. Комісія відмічає також теоретичний вклад Карпенко С.В. у вирішення проблеми підвищення якості очистки авіаційних двигунів.

Взаємних фінансових претензій організації не мають.

Директор технічний



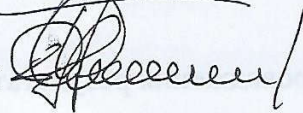
В.В. Жигинас

Головний конструктор



О.В. Кіпров

Головний контролер – начальник ВТК



- С.А. Любченко

ЗАТВЕРДЖУЮ:

ДП «ЗАВОД 410ЦА»

О. Ю. Пашенко

Генеральний директор

03. 2021р.



ПРОМИСЛОВО-ФІНАНСОВА  
КОМПАНІЯ  
«ТЕХНОПОЛЮС»



INDUSTRIAL FINANCIAL  
COMPANY  
«TEHNOPOLE»

Адреса:  
03150, м. Київ, бул. Лесі Українки, 5 а  
Поштова адреса:  
01001, Україна, м. Київ -1, а/с -484В

Тел.: +38 (044) 599-35-27; 599-16-92  
Тел/факс: +38 (044) 287-73-87  
E-mail: technopole-ifc@ukr.net

№ 20/20081-ТТ

«08» листопада 2021 р.

## АКТ

впровадження дисертаційного дослідження

Карпенка Сергія Володимировича щодо нової технології очищення поверхні лопаток осьових компресорів газотурбінних установок

Цим актом підтверджується, що дисертаційне дослідження Карпенка С.В. було використано у проекті, який виконувався компанією ТОВ ПФК «Технополус» по очистці та дезактивації обладнання на АЕС.

Завдяки дослідженню Карпенка С.В. у реалізації проекту була вирішена задача по створенню пристрою очищення поверхні різного обладнання, у якому завдяки зміні технологічного процесу та використанню нових засобів, таких як пристрій для отримання водяних гранул льоду різного діаметра, з'явилась можливість автоматизувати процес очищення поверхні, а також досягти якісного очищення поверхні, скоротити тривалість процесу очищення та його вартість.

На підставі дослідження Карпенка С.В. була спроектована експериментальна установка по отриманню гранул низькотемпературного льоду, яка була виготовлена та випробувана на виробництві ТОВ ПФК «Технополус».

Цей документ не є підставою для висування будь яких фінансових претензій ТОВ ПФК «Технополус».

Генеральний директор  
ТОВ ПФК «Технополус»



Шпаковський Е.М.