

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРАЦІЙНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ДЕТОНАЦІЙНОГО ЗГОРЯННЯ В СИЛОВИХ ЦИЛІНДРАХ ГАЗОМОТОКОМПРЕСОРІВ 10 ГКН

<sup>1</sup>Л.М.Заміховський, <sup>1</sup>Б.В.Копей, <sup>2</sup>С.О.Саприкін, <sup>2</sup>С.І.Галій

<sup>1</sup>ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 40534  
e-mail: koreyb@nimg.edu.ua

<sup>2</sup>УкрНДГаз, 61125, Харків, Красношкільна наб., 20, тел. (057) 7300389

*Розроблено непрямий метод визначення детонаційного горіння в силових циліндрах газового двигуна ГМК. Знайдено частотний діапазон, найбільш характерний для виявлення детонаційного згоряння на кожному режимі експлуатації ГМК 10 ГКН. Побудовано графік залежності середніх квадратичних значень спектрів, розрахованих у виділеному частотному діапазоні, від ефективної потужності газового двигуна на всіх експлуатаційних режимах роботи двигуна з визначенням зон детонаційного і бездетонаційного згоряння. Створено прилад для контролю детонаційного горіння в силових циліндрах газового двигуна ГМК.*

Ключові слова: детонаційне горіння, газовий двигун, газомотокомпресор, спектр, вібрації.

*Разработан непрямой метод определения детонационного горения в силовых цилиндрах газового двигателя ГМК. Найден частотный диапазон, наиболее характерный для выявления детонационного сгорания на каждом режиме эксплуатации ГМК 10 ГКН. Построен график зависимости средних квадратичных значений спектров, рассчитанных в выделенном частотном диапазоне от эффективной мощности газового двигателя на всех эксплуатационных режимах работы двигателя с определением зон детонационного и бездетонационного сгорания. Создан прибор для контроля детонационного горения в силовых цилиндрах газового двигателя ГМК.*

Ключевые слова: детонационное горение, газовый двигатель, газомотокомпрессор, спектр, вибрации.

*The indirect method for determination of the detonation burning in the power cylinders of the gas engine of gasmotocompressor (GMC) is developed. A most characteristic frequency range for the exposure of detonation burning on every mode of the GMC 10GKN exploitation is found. The graph of dependence of mean quadratic values of the spectrums expected in the selected frequency range from effective gas engine power on all operating modes of operations of engine with determination of areas of detonation and nondetonation burning is built. A device for the control of the detonation burning in the power cylinders of the gas engine GMC is designed.*

Keywords: detonation burning, gas engine, gasmotocompressor, spectra, vibration

**Вступ.** При роботі газових двигунів газомотокомпресорів (ГМК) 10 ГКН з детонаційним згорянням у силових циліндрах (СЦ) погіршується їхня економічність, збільшується кількість викидів забруднюючих речовин в атмосферу, а також число відмов вузлів агрегатів.

Явище детонації складається в досить швидкому завершенні процесу згоряння в результаті багатостадійного самозапалювання частини робочої суміші перед фронтом полум'я, що супроводжується виникненням ударних хвиль, які, у свою чергу, стимулюють згоряння всієї робочої суміші, що залишилася, з надзвуквою швидкістю.

Ударні хвилі при своєму багаторазовому відбитті від стінок можуть механічно порушити чи зняти масляну плівку з поверхні гільзи, що призводить до збільшення зношення циліндрів і поршневих кілець. Крім того, вібраційний характер навантаження на поршень при наявності детонації може викликати руйнування антифрикційного шару в шатунних підшипниках.

Таким чином, питання контролю детонаційного згоряння, а також його своєчасного запобігання є дуже актуальними.

Згідно з тематичним планом ДК “Укргазвидобування”, УкрНДГаз займається розроб-

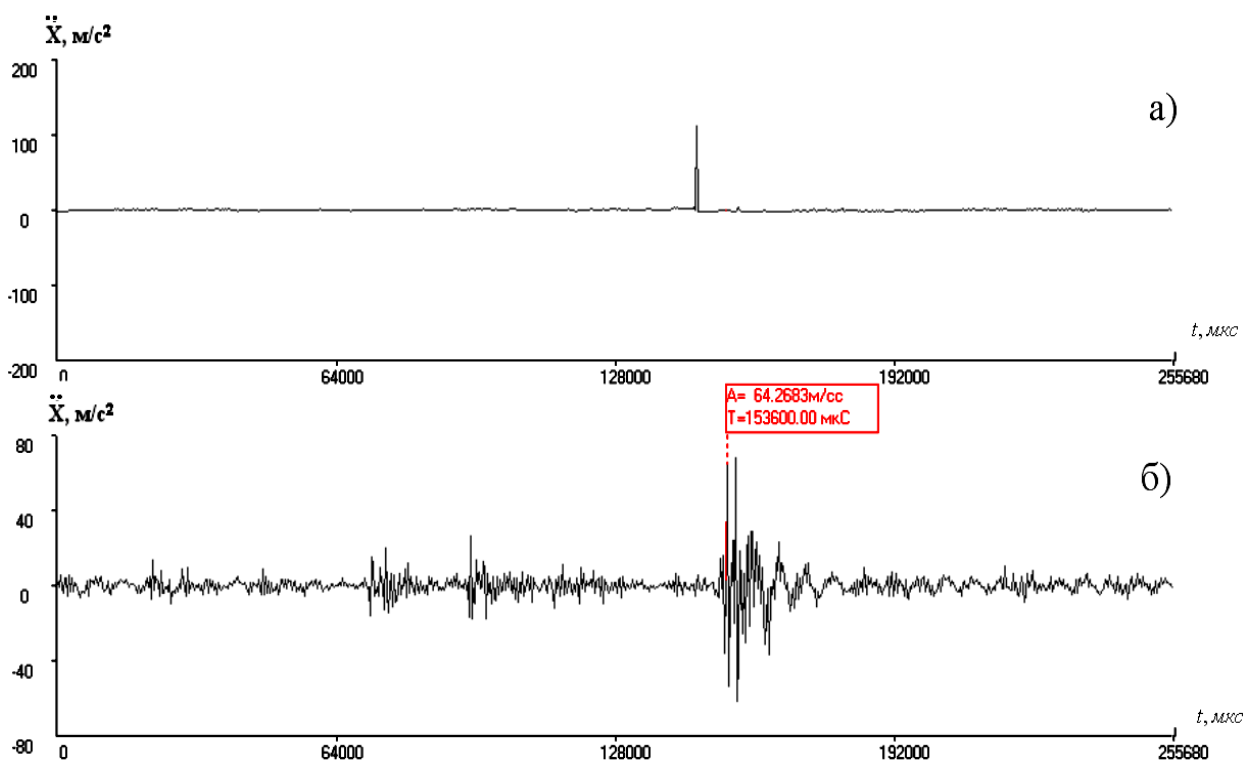
кою методів діагностування ГМК, спрямованих на збільшення ресурсу їх експлуатації, надійності та підтримання справного технічного стану.

**Аналіз публікацій.** Відомо, що детонаційне згоряння ГМК відбувається з наступних причин [1]:

- присутності в газі важких вуглеводнів чи конденсату;
- перевантаження ГМК чи нерівномірного розподілу навантаження між СЦ газового двигуна;
- підвищення температури продувального повітря;
- занадто великого кута випередження запалювання.

Також, детонаційне згоряння виникає у випадку, коли через підвищений знос циліндропоршневої групи в камеру згоряння попадає моторне масло.

Відзначено, що значна частина поломок колінчастих валів відбулася тоді, коли ГМК перебував в режимі тривалої роботи із детонаційним згорянням. Унаслідок тривалої детонації руйнується бабітовий шар шатунних вкладок, утворюються втомні тріщини в силових циліндрах, поршнях, кришках, передчасно зношується шатунний механізм.



а) графік відмітки ВМТ поршня досліджуваного силового циліндра;  
б) вібраційний сигнал коливання стінок силового циліндра

**Рисунок 1 – Вібраційний сигнал коливання стінок силового циліндра в смузі частот 10–2500 Гц з одночасною фіксацією відмітником положення верхньої мертвої точки поршня**

Контроль детонаційного згоряння паливної суміші в СЦ газового двигуна ГМК 10 ГКН виконується за допомогою індикаторних діаграм робочого процесу, що індукується за допомогою механічного індикатору типу «Майгак» серії 30 або 50 [1].

Крім контролю детонаційного згоряння механічними індикаторами, відомий спосіб діагностування двигуна внутрішнього згоряння [2], коли за допомогою датчика реєструють коливання, наприклад, стінок камери згоряння, щонайменше в одному частотному діапазоні, що відповідає частоті коливань при детонації, здійснюють фільтрацію цих коливань, формують обвідну цього сигналу, а потім порівнюють її з еталонним сигналом, визначеним в тому ж частотному діапазоні, і на основі оцінки подібності форми порівнюваних кривих роблять висновки про наявність або відсутність детонації у двигуні.

Недоліком відомого способу є те, що для визначення детонації за допомогою цього способу необхідна розробка і використання спеціального пристрою для обробки вимірних сигналів, побудови обвідної цих сигналів та порівняння їх з еталонним сигналом.

У зв'язку з тим, що в умовах експлуатації часто виникають труднощі з індукуванням робочого процесу через відсутність механічних індикаторів або справних індикаторних кранів, виникає необхідність розробки непрямого методу контролю детонаційного згоряння паливної суміші.

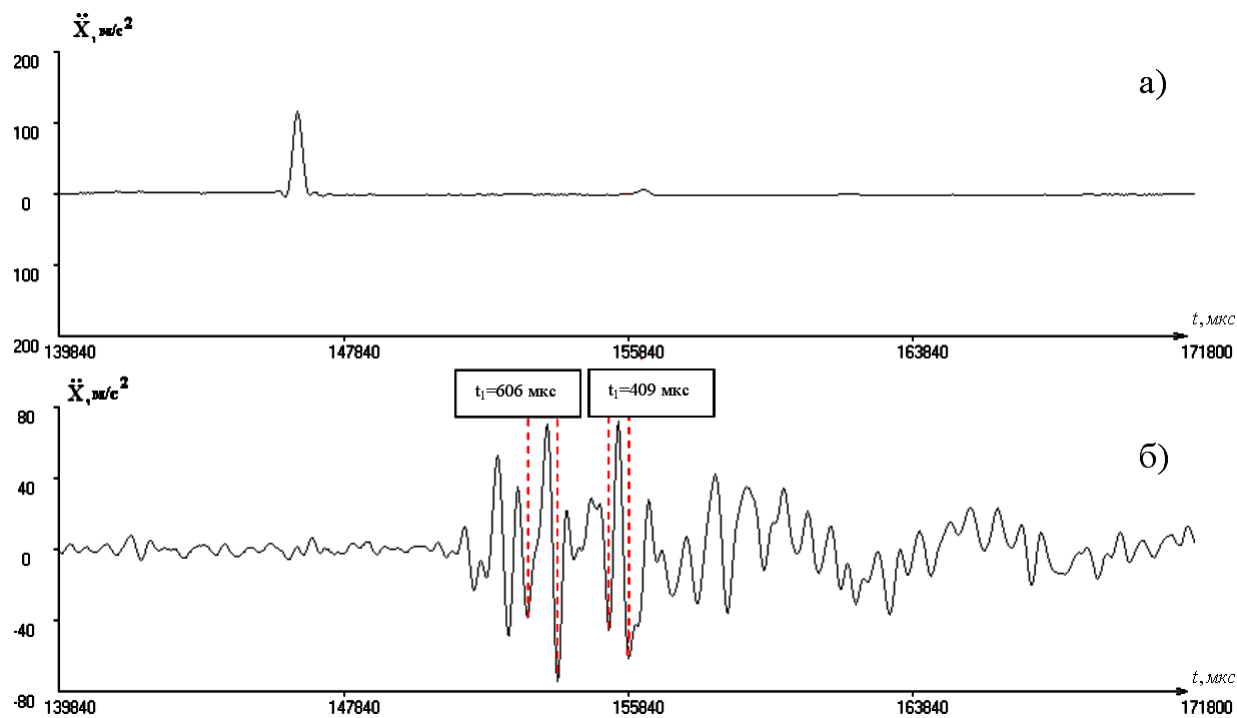
**Мета досліджень.** Було поставлено задачу розробки метода оперативного виявлення детонаційного горіння в двигуні внутрішнього згоряння непрямым методом за відсутності можливості прямого індукування робочого процесу в силових циліндрах і розробки спеціального пристрою для обробки вимірних сигналів, побудови обвідної цих сигналів.

**Результати досліджень.** Для вирішення поставленої задачі розроблено метод діагностування детонаційного згоряння газового двигуна газомотокомпресора (ГМК) 10 ГКН [3, 4].

УкрНДГазом проведено експериментальні дослідження контролю детонаційного згоряння на Червонодонській, Машівській дожимних компресорних станціях (ДКС), ДКС Хідновичі, компресорних цехах Котелевської, Тимофіївської установокі сайклінг-процесу.

На працюючих агрегатах реєструвались коливання стінок силових циліндрів віброперетворювачем в смузі частот 10–2500 Гц з одночасною фіксацією відмітником положення верхньої мертвої точки (ВМТ) поршня силового циліндра (рисунок 1).

Проаналізувавши вібраційні сигнали, було знайдено частотний діапазон, найбільш характерний для детонаційного згоряння. Для цього на вібраційному сигналі було виділено відрізок, початок і закінчення якого визначені в часі як початок і закінчення процесу згоряння за допомогою прив'язки до зафіксованого положення верхньої мертвої точки поршня силового циліндра.



а) графік відмітки ВМТ поршня досліджуваного силового циліндра;  
 б) вібраційний сигнал коливання стінок силового циліндра

**Рисунок 2 – Визначення мінімального і максимального періоду коливання сигналу з амплітудами, що відповідають детонаційному горінню**

**Таблиця 1 – Значення частотного діапазону коливання сигналу з найбільшими амплітудами, що можуть відповідати детонаційному горінню**

| № СЦ  | Pz, МПа | Сигнал 1    |             | Сигнал 2    |             | Сигнал ...  |             | Сигнал 50   |             |
|-------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|       |         | Частота min | Частота max | Частота min | Частота max | Частота min | Частота max | Частота min | Частота max |
| 1 СЦ  | 3,4     | 1000,0      | 1852,0      | 1190,0      | 1923,0      | 1471,0      | 2273,0      | 1471,0      | 2083,0      |
| 3 СЦ  | 3,5     | 1000,0      | 1852,0      | 1250,0      | 1786,0      | 1471,0      | 2272,0      | 1563,0      | 1852,0      |
| 5 СЦ  | 3,5     | 1190,0      | 2500,0      | 1316,0      | 1786,0      | 893,0       | 1786,0      | 1316,0      | 2500,0      |
| 7 СЦ  | 4,0     | 926,0       | 1563,0      | 833,0       | 1190,0      | 806,0       | 1563,0      | 1136,0      | 1667,0      |
| 9 СЦ  | 3,8     | 1515,0      | 1923,0      | 1250,0      | 1923,0      | 1250,0      | 1786,0      | 1250,0      | 2273,0      |
| 2 СЦ  | 3,0     | 1190,0      | 2778,0      | 2273,0      | 2632,0      | 2083,0      | 2273,0      | 2381,0      | 3125,0      |
| 4 СЦ  | 3,0     | 2500,0      | 3000,0      | 2500,0      | 3000,0      | 1666,7      | 2272,7      | 2272,7      | 3000,0      |
| 6 СЦ  | 5,0     | 1724,1      | 3000,0      | 1612,9      | 3000,0      | 2381,0      | 3846,2      | 2500,0      | 3000,0      |
| 8 СЦ  | 5,0     | 2272,7      | 3000,0      | 2173,9      | 3000,0      | 2500,0      | 3000,0      | 2173,9      | 3000,0      |
| 10 СЦ | 5,0     | 1923,1      | 3000,0      | 1851,9      | 3000,0      | 2000,0      | 3000,0      | 2173,9      | 3000,0      |

ндра. На відрізу було визначено найбільші амплітуди коливання сигналу, що відповідають детонаційному горінню (рисунок 2) та їх мінімальні і максимальні частоти коливання.

Для більш точного визначення частотного діапазону, найбільш характерного для детонаційного згоряння на кожному режимі експлуатації агрегатів, проводилось не менше 50 досліджень при заздалегідь детонаційному згорянні (таблиця 1).

У знайденому частотному діапазоні 1650,0 - 2430,0 Гц визначають середнє квадратичне значення (СКЗ) амплітуди сигналу кожного силового циліндра та ефективну потужність двигуна внутрішнього згоряння (таблиця 2).

Для встановлення наявності детонаційного згоряння в діагностованому циліндрі необхідно порівнювати значення залежності СКЗ амплітуди сигналу відомого частотного діапазону від ефективної потужності двигуна з еталонним значенням, що відповідає бездетонаційному згорянню.

Для визначення еталонної моделі розраховувалось середнє квадратичне значення спектрів у виділеному частотному діапазоні (рис. 3) на завідомо детонаційному і бездетонаційному згорянні на всіх експлуатаційних режимах роботи двигуна. Еталонну модель було створено у вигляді графіку залежності середніх квадратичних значень спектрів, розрахованих у виділено-

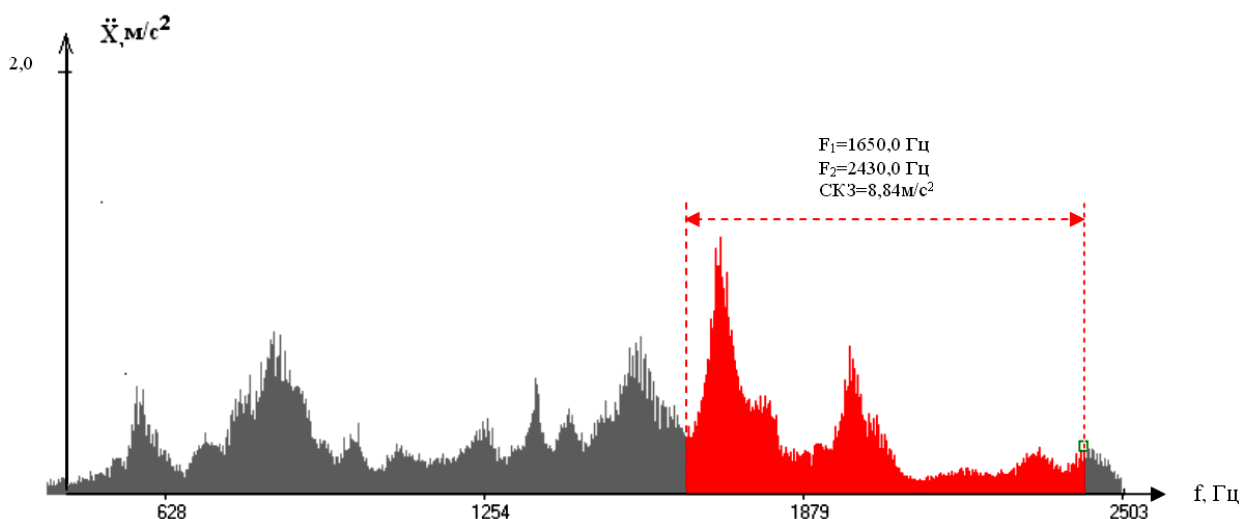
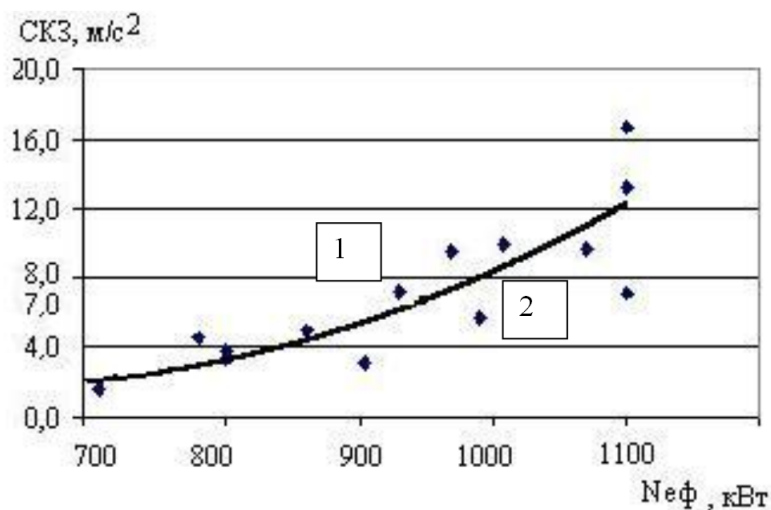


Рисунок 3 – Виділений частотний діапазон на задалегд детонаційному згорянні



1 – зона детонаційного горіння; 2 – зона бездетонаційного горіння

Рисунок 4 – Графік залежності середніх квадратичних значень спектрів, розрахованих у виділеному частотному діапазоні, від ефективної потужності газового двигуна на всіх експлуатаційних режимах роботи двигуна з визначенням зон детонаційного і бездетонаційного згорання

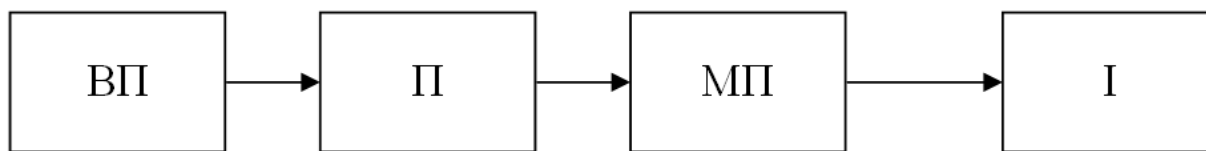
Таблиця 2 – СКЗ амплітуди сигналу кожного силового циліндра, визначені при роботі двигуна з детонаційним і бездетонаційним процесом згорання

| № СЦ  | $N_{ef}$ , кВт | $СКЗ$ , $m/s^2$ |
|-------|----------------|-----------------|
| 1 СЦ  | 950,0          | 4,6             |
| 3 СЦ  | 950,0          | 3,8             |
| 5 СЦ  | 950,0          | 3,3             |
| 7 СЦ  | 950,0          | 3,1             |
| 9 СЦ  | 950,0          | 5,0             |
| 2 СЦ  | 950,0          | 1,3             |
| 4 СЦ  | 950,0          | 1,6             |
| 6 СЦ  | 950,0          | 13,2            |
| 8 СЦ  | 950,0          | 7,1             |
| 10 СЦ | 950,0          | 16,7            |

му частотному діапазоні, від ефективної потужності двигуна внутрішнього згорання на всіх експлуатаційних режимах роботи двигуна з визначенням зон детонаційного і бездетонаційного згорання (рисунки 4). Графік залежності побудовано за допомогою методу найменших квадратів [5].

Граничні значення СКЗ між детонаційним і бездетонаційним згоранням встановлено шляхом усереднення серії значень СКЗ, визначених під час роботи двигуна за детонаційного і бездетонаційного процесів згорання при різних значеннях ефективної потужності.

Для контролю детонаційного горіння в силових циліндрах газового двигуна ГМК з використанням непрямого методу створено прилад [6, 7]. Структурну схему приладу наведено на рисунку 5.



**Рисунок 5 – Структурна схема приладу для контролю детонаційного горіння в силових циліндрах газового двигуна ГМК з використанням непрямого методу**

До складу приладу входять: віброперетворювач ВП, підсилювач П, мікропроцесор МП та індикатор І.

Сигнал віброперетворювача ВП після підсилювача П подається на вхід мікропроцесора МП, який запрограмовано таким чином, що за допомогою кнопок керування, розташованих на передній панелі приладу, можна задавати режим вимірювання та діагностування детонаційного горіння.

**Наукова новизна.** Запропоновано використання непрямого методу визначення детонаційного горіння в силових циліндрах газового двигуна ГМК. Визначено частотний діапазон, найбільш характерний для виявлення детонаційного згорання на кожному режимі експлуатації ГМК 10 ГКН. Побудовано графік залежності середніх квадратичних значень спектрів, розрахованих у виділеному частотному діапазоні, від ефективної потужності газового двигуна на всіх експлуатаційних режимах роботи двигуна з визначенням зон детонаційного і бездетонаційного згорання. Створено прилад для контролю детонаційного горіння в силових циліндрах газового двигуна ГМК з використанням непрямого методу.

**Висновок.** Використання запропонованого методу дасть змогу суттєво підвищити оперативність визначення детонаційного горіння в силових циліндрах газового двигуна ГМК. Підвищення оперативності досягається можливістю визначення СКЗ спектра сигналу портативним віброметром чи спеціальним приладом у заданому частотному діапазоні та враховуючи значення ефективної потужності двигуна з одночасним визначенням відповідності отриманого результату у полі значень еталонної моделі до детонаційної чи бездетонаційної зони. Завдяки цьому значно підвищується універсальність методу і сфера його застосування.

Своєчасне виявлення детонаційного горіння в силових циліндрах газового двигуна ГМК і його ліквідація дасть можливість зменшити кількість руйнувань його вузлів, витрати на ремонт, кількість забрудників в атмосферу.

### *Література*

- 1 Грошиков В.Я. Транспорт и хранение газа. Повышение уровня эксплуатационной надежности газомоторных компрессоров типа 10 ГКН. / В.Я. Грошиков, М.Г. Степанов. – Москва, 1975. – 51 с.
- 2 Авторське свідоцтво СРСР № 1665252 А1, МПК G01M 15/00. Спосіб виявлення детонації у двигуні внутрішнього згорання. Опубл. 23.07.1991 р.
- 3 Пат. 35871 Україна, G01M15/00. Спосіб виявлення детонації у двигуні внутрішнього згорання з іскровим запалюванням / Саприкін С.О., Галій С.І. – Заявл. 21.04.2008; Опубл. 10.10.2008, Бюл. № 19.
- 4 Саприкін С.О., Галій С.І. Розробка методу вібраційного контролю детонаційного згорання в силових циліндрах газомоторних компресорів 10 ГКН // Збірник тез доповідей 5-ої науково-технічної конференції «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного нафтогазопромислового обладнання», 2-5 грудня 2008 р., м. Івано-Франківськ. – 2008. – С.169-172.
- 5 Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – Москва: Наука, 1968. – 720 с.
- 6 Сапрыкин С.А. Вибродиагностирование основных узлов газомоторных компрессоров // Автомобильный транспорт : Сб. научн. трудов. – 2006. – Вып. 18. – С.89-96.
- 7 Саприкін С.О. Прилади та методи віброконтролю і вібродіагностування газоперекачувальних агрегатів та компресорних установок газотранспортної системи України // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2006. – 2. – С. 33-38.

*Стаття поступила в редакційну колегію  
02.07.09*

*Рекомендована до друку професором  
Семенцовим Г.Н.*