

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
ДП «Дослідно-проектний центр кораблебудування»
Одеський національний морський університет
Херсонська державна морська академія
ДП Науково-виробничий комплекс газотурбобудування «Зоря»–«Машпроект»
Регістр судноплавства України
Харбінський інженерний університет (Китай)
Університет науки і технологій Цзянсу (Китай)
Західнопоморський технологічний університет (Польща)
Батумський навчально-навігаційний університет (Грузія)
MV WERFTEN Wismar GmbH (Німеччина)

МАТЕРІАЛИ

X МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

СУДНОВА ЕНЕРГЕТИКА: СТАН ТА ПРОБЛЕМИ

4–5 листопада 2021 року



Видавничий дім
«Гельветика»
2021

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ

Голова: *Трушляков Є.І.* – д.т.н., проф. (Україна)

Заступники голови: *Павлов Г.В.* – д.т.н., проф. (Україна); *Сербін С.І.* – д.т.н., проф. (Україна); *Горбов В.М.* – к.т.н., проф. (Україна)

Вчений секретар: *Мітєнкова В.С.* – к.т.н, доцент (Україна)

Члени оргкомітету: *Белоусов Є.В.* – д.т.н., доц. (Україна); *Варбанець Р.А.* – д.т.н., проф. (Україна); *Грицук І.В.* – д.т.н., проф. (Україна); *Димо Б.В.* – к.т.н., проф. (Україна); *Радченко М.І.* – д.т.н., проф. (Україна); *Ткач М.Р.* – д.т.н., проф. (Україна); *Ся Гуйхуа* – prof (КНР); *Хведелидзе П.Г.* – д.т.н. проф. (Грузія); *Чередніченко О.К.* – д.т.н., доц. (Україна); *Чобенко В.Н.* – к.т.н. (Україна); *Шостак В.П.* – к.т.н., проф. (Україна); *Gershanik V.I.* – DSc (Німеччина); *Stachel A.A.* – DSc, Prof (Польща); *Themelis N.J.* – PhD (США)

Матеріали публікуються за оригіналами, поданими авторами. Претензії до організаторів не приймаються.

Відповідальний за випуск Горбов В.М.

Суднова енергетика: стан та проблеми : Матеріали
X Міжнародної науково-технічної конференції, 4–5 листопада
2021 року. – Миколаїв : Видавничий дім «Гельветика», 2021. – 358 с.
ISBN 000–000–000–000–0

У збірнику наведені матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції, яка відбулась у Національному університеті кораблебудування (м. Миколаїв) 4–5 листопада 2021 року. Розглянуто різні аспекти науково-технічних, організаційних та екологічних питань, пов'язаних з дослідженням, проектуванням, виготовленням та експлуатацією суднових енергетичних установок суден різного призначення, дослідженням робочих процесів у елементах суднових енергетичних установок, а також шляхам удосконалення підготовки фахівців з суднової енергетики у вищих навчальних закладах. Матеріали збірника можуть бути корисними для науковців, інженерно-технічних працівників, викладачів, студентів та аспірантів.

УДК 629.12.03

ЗМІСТ

ПЛЕНАРНЕ ЗАСІДАННЯ

<i>Trushliakov E., Radchenko M., Bohdal T., Tkachenko V., Tsaran F.</i> Increasing Performance of Air Conditioning System in Actual Climatic Conditions.....	9
<i>Serbin S., Burunsuz K., Chen D., Zongming Y.</i> Characteristics of a Combustion Chamber of a Gas Turbine Engine Operating on Associated Gas.....	12
<i>Гершаник В. И.</i> Оценка воздействия круизного судна на окружающую среду	15
<i>Варбанець Р.А., Кирнац В.І., Холденко В.І., Александровська Н.І.</i> Моделювання робочого процесу за даними систем DEPAS та IMES. Діагностика циліндрового змащування.....	20
<i>Нікончук С.В.</i> Влияние процесса декарбонизации топлива и выбросов на современный рынок судостроения и процесс подготовки молодых специалистов.....	22
<i>Чередніченко О.К.</i> Адаптація об'єктно-орієнтованих підходів до розв'язання задач дослідження енергетичних установок морських об'єктів нафтогазовидобування	24
<i>Коробко В.В.</i> Термоакустичні системи енергозбереження в судновій енергетиці	29
<i>Горбов В.М., Мітєнкова В.С.</i> Нариси з історії конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми»	33

Секція № 1. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ

<i>Патлайчук В.М., Патлайчук О.В., Борщов О.М.</i> Розробка конструкції газотурбінного агрегату з ежекційним перерозширенням газу в турбіні	51
<i>Патлайчук В.М., Пустовойченко А.Є., Борщов О.М.</i> Методика теплового розрахунку газотурбінного агрегату з ежекційним перерозширенням газу в турбіні	55
<i>Погорлецький Д.С., Голота Є.С.</i> Модернізація системи охолодження гідравлічної рідини суднового крану Macgregor	58

Секція № 2. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ У ЕЛЕМЕНТАХ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

<i>Белоусов Е.В., Савчук В.П., Самарин А.Е., Белоусова Т.П., Рыбальченко Н.Е.</i> Истечение газового топлива из сопловых каналов газоподающего модуля малооборотного газодизельного двигателя среднего давления	126
<i>Ніколаєв Є.М., Бондаренко М.С.</i> Удосконалення системи охолодження головного двигуна судна проекту CNF09	131
<i>Ватаман Р.В.</i> Анализ эффективности теплоиспользующих систем охлаждения наддувочного воздуха дизельных установок	135
<i>Forduy S., Radchenko A., Zubarev A., Bohdal L., Khaldobin V., Konovalov A.</i> Increasing efficiency of gas engines in integrated energy system by scavenge air cooling in absorption chiller	139
<i>Forduy S., Zubarev A., Mikieliewicz D., Ostapenko O., Hrych A., Khaldobin V.</i> Improving the efficiency of gas engine heat utilization by ejector-absorption chillers.....	141
<i>Козловський А.В.</i> Вплив геометричних параметрів проточної частини камери згоряння ГТД на стійкість процесів горіння	144
<i>Козловський А.В., Баклан О.В.</i> Дослідження параметрів турбіни високого тиску ГТА з ТУК номінальною споживаною потужністю 25 МВт.....	146
<i>Козловський А.В., Вілкул С.В.</i> Дослідження характеристик плазмового генератора, призначеного для підвищення стабільності процесів в камері згоряння ГТД.....	148
<i>Лашко П.В.</i> Анализ схем теплоиспользующей установки охлаждения наддувочного воздуха с использованием избыточной теплоты уходящих газов на выходе	151
<i>Личко Б.М., Макаренко О.С., Проскурін А.Ю., Резанов І.О., Пінчук П.О.</i> Вдосконалення системи управління подачею палива дизельних двигунів.....	155
<i>Маулевич В.О., Варбанець Р.А.</i> Експлуатація судових двигунів MAN B&W типу ME з електронним керуванням на низькосірчаному паливі.....	157
<i>Мінчев Д.С., Гогоренко О.А., Мошенцев Ю.Л.</i> Експериментальне дослідження режимів роботи відцентрового компресора	160
<i>Мухаметханов Р.С.</i> Визначення резервів підвищення ефективності турбонаддуву судових дизелів і напрямку їх реалізації	166
<i>Наливайко В.С., Хоменко В.С., Савчук П.С.</i> Історія створення двигунів внутрішнього згоряння типу Д100	170
<i>Наливайко В.С., Авдюнін Р.Ю., Челпанов А.О.</i> Аналіз взаємного руху поршнів двотактного дизеля типу Д100.....	173
<i>Грич А.В., Остапенко О.В.</i> Вплив двоступеневого кондиціювання повітря на ефективність газових двигунів автономної теплоелектростанції	178
<i>Грубий М.А., Коштовний В.П.</i> Покращення показників судових СОД при використанні водню в якості палива.....	181
<i>Остапенко А.В., Грич А.В.</i> Повышение эффективности трансформации теплоты гозового двигателя в холод использованием ступенчатой трансформации в ЭХМ и	185

УДК 621.431

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВІДЦЕНТРОВОГО КОМПРЕСОРА

Мінчев Д. С.

кандидат технічних наук,

*доцент кафедри двигунів внутрішнього згоряння, установок
та технічної експлуатації*

*Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова
м. Миколаїв, Україна*

dmytro.minchev@nuos.edu.ua

Гогоренко О. А.

кандидат технічних наук,

*доцент кафедри двигунів внутрішнього згоряння, установок
та технічної експлуатації*

*Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова
м. Миколаїв, Україна*

oleksii.gogorenko@nuos.edu.ua

Мошенцев Ю. Л.

кандидат технічних наук,

*професор кафедри двигунів внутрішнього згоряння, установок
та технічної експлуатації*

*Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова
м. Миколаїв, Україна*

yurii.moshentsev@nuos.edu.ua

Анотація. Представлені схема дослідного стенду на базі відцентрового компресора авіаційного двигуна Walter 332. Використання різних конфігурацій стенда дозволяє виконувати експериментальні дослідження роботи компресора як на усталених режимах, так і в усіх видах неусталених режимів: обертового зриву, помірного помпажу та глибокого помпажу. Результати випробувань наведені в графічному вигляді.

Ключові слова: відцентровий компресор, помпаж, обертовий зрив, наддув ДВЗ

Відцентрові компресори широко використовуються для наддуву ДВЗ – як у складі турбокомпресора, так і в вигляді механічних нагнітачів. Цей тип компресора забезпечує високу ефективність у поєднанні з невеликими розмірами, але він також має деякі добре відомі недоліки пов'язані з узгодженням роботи з поршневою частиною двигуна. По-перше, відцентрові компресори потребують системи регулювання для досягнення бажаного рівня тиску наддуву в широкому діапазоні роботи двигуна, а по-друге, вони мають діапазон режимів, які характеризуються нестабільною роботою системи стиснення повітря. Розрізняють нестабільну роботу системи стиснення, при якій компресор працює в режимі обертового зриву та в режимі помпажу. Обидва ці режими можуть бути причиною зменшення ресурсу агрегату наддуву та двигуна в цілому і навіть призводити до аварійної зупинки двигуна. Отже, вони мають бути уникнені в експлуатації.

Експериментальні випробування ступені відцентрового компресора для всього діапазону можливих режимів роботи були здійснені на спеціальному стенді. Випробувальний стенд може мати три конфігурації, що дозволяє досліджувати три типи роботи компресора і зоні нестабільної роботи (зліва від границі помпажа на характеристиці компресора): «помірний» помпаж, «глибокий» помпаж та режим обертового зриву потоку.

Схема випробувального стенду наведена на Рис. 1. Відцентровий компресор авіаційного двигуна Walter M332 поєднаний з електричним двигуном постійного струму через планетарну передачу. Компресор нагнітає повітря до ресивера через вихідну трубу. Дві дросельні заслінки встановлені в проточній частині та слугують для зміни витрати повітря компресором. Основний дросель знаходиться на виході з ресивера, тоді як допоміжний дросель розташований близько до випускного отвору компресора перед ресивером. Допоміжний дросель служить для регулювання витрати повітря при роботі компресора за границею помпажу в режимі обертового зриву, а основний дросель використовується для вимірювання стандартної універсальної характеристики компресора а також для переведення системи стиснення в режими «помірного» та «глибокого» помпажу. «Глибокий» помпаж при цьому може бути отриманий за допомогою короткого нагнітального трубопроводу, що поєднує ресивер і вихідний отвір повітрязбірного корпусу компресора, тоді як «помірний» помпаж притаманний системі з довгим нагнітальним трубопроводом.

Стенд оснащений необхідними засобами вимірювання. Витрата повітря на усталеному режимі роботи вимірюється за допомогою стандартної впускної насадки або за допомогою датчика масової витрати повітря Siemens VDO 5WK9 6351. Для вимірювання зворотної витрати повітря та для фіксації швидкості повітря в умовах неусталених режимів роботи компресора використовувались трубки Піто: одна з них спрямована на вхід компресора, а друга – протилежно, на вхід повітря. Детальний вигляд схеми встановлення датчиків наведений на Рис. 4.9. Датчики тиску Motorola MPX5010DP диференціального типу використовуються для вимірювання рівня падіння тиску для зазначених цілей.

Результати статичних випробувань представлені на Рис. 2. Зазначені швидкість обертання колеса та витрата повітря визначаються як:

$$G_{air.ref} = G_{air} \frac{\sqrt{T_{int} / T_{ref}}}{(p_0 - \Delta p_{int}) / p_{ref}}, \quad n_{cmpr.ref} = n_{cmpr} \sqrt{\frac{T_{int}}{T_{ref}}}$$

де p_0 – барометричний тиск, $T_{ref} = 300$ K та $p_{ref} = 96$ кПа – стандартні температура та тиск відповідно.

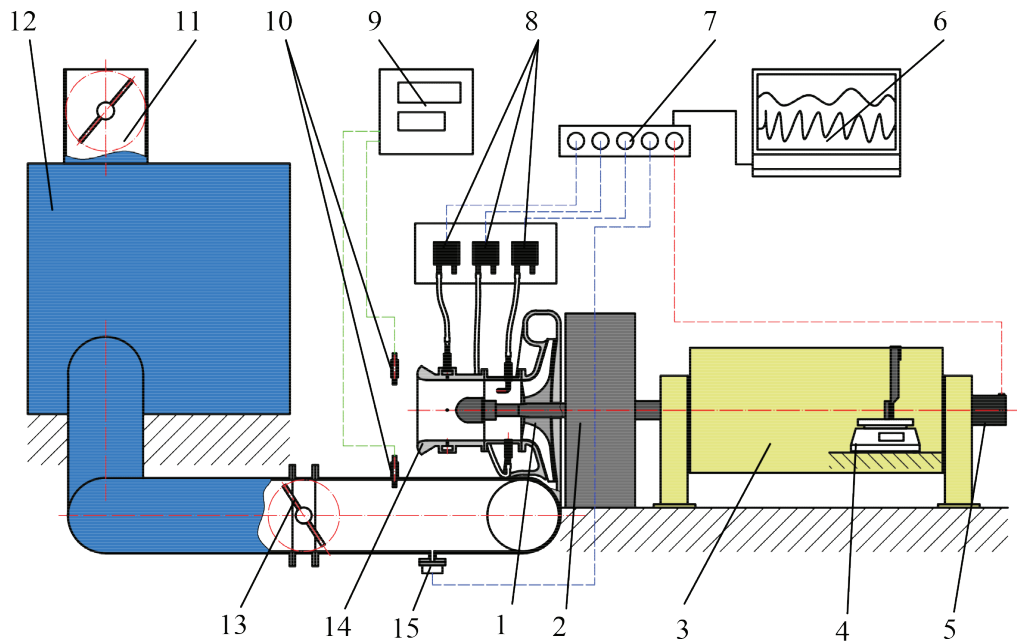


Рис. 1. Схема випробувального стенду ступеня відцентрового компресора.

1 – колесо компресора; 2- планетарна передача; 3 – електричний двигун постійного струму; 4 – електронні ваги; 5 – тахогенератор; 6 – персональний комп'ютер; 7 – аналого-цифровий конвертер; 8 – низка датчиків тиску Motorola MPX5010DP; 9 – електронний термометр; 10 – хромель-алюмелеві термопари; 12 – основний дросель; 12 – ресивер; 13 – допоміжний дросель; 14 – насадка для вимірювання витрати повітря (може бути замінена на датчик масової витрати повітря в залежності від мети експерименту Siemens VDO); 15 – датчик абсолютного тиску (Bosch 0281002401).

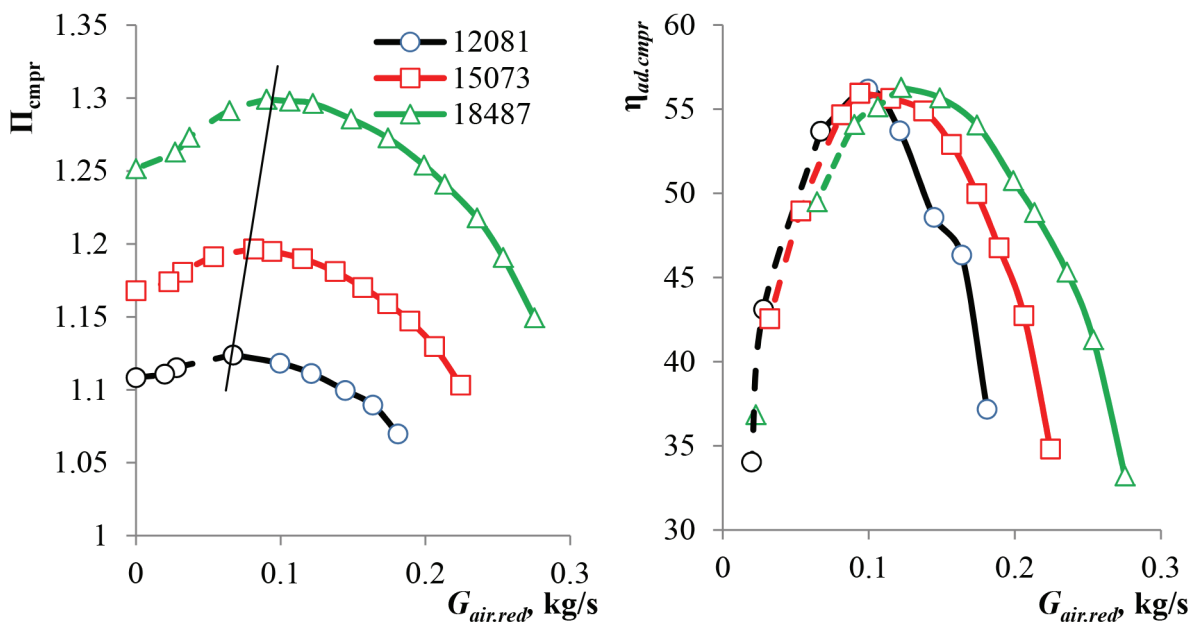


Рис. 2. Експериментальні статичні характеристики компресора:

- суцільні лінії відповідають роботі компресора при повністю відкритому допоміжному дроселі та регулюванні витрати повітря за рахунок основного дроселя;
- пунктирні лінії отримані при регулюванні витрати повітря допоміжним дроселем.

Представлені три криві постійної швидкості (ізотахи). Кожна ізотаха має дві частини. Перша частина описує роботу компресора з великим об'ємом ресивера – потік повітря контролюється основною дросельною заслінкою на виході з бака ресивера, тоді як допоміжний дросель на вході в ресивер повністю відкритий. Друга частина отримана як результат вимірювань роботи компресора на ресивер малого обсягу, коли потік повітря контролюється допоміжною дросельною заслінкою на вході в бак ресивера, а основний дросель на виході з ресивера залишається відкритим. Стабільна робота компресора з великим об'ємом приймача в цій області неможлива, оскільки виникає помпаж системи стиснення.

Безрозмірне представлення характеристик компресора показує, що експериментальні точки лежать на єдиній кривій, як це видно з Рис. 3. Коефіцієнт витрати Φ та коефіцієнт підвищення тиску Ψ_{cmpr} визначаються як:

$$\Phi = \frac{G_{air.ref}}{\rho_0 A_{cmpr} u_2}; \quad \Psi_{cmpr} = \frac{2\Delta p_{cmpr}}{\rho_0 u_2^2},$$

де Δp_{cmpr} – різниця тиску на нагнітанні та вході в компресор.

Таким чином, для вимірюваного діапазону швидкості компресора карти характеристики компресора – як витратна, так і характеристика ефективності – можуть бути виражені поліноміальними лініями, що дуже спрощує подальше їх застосування.

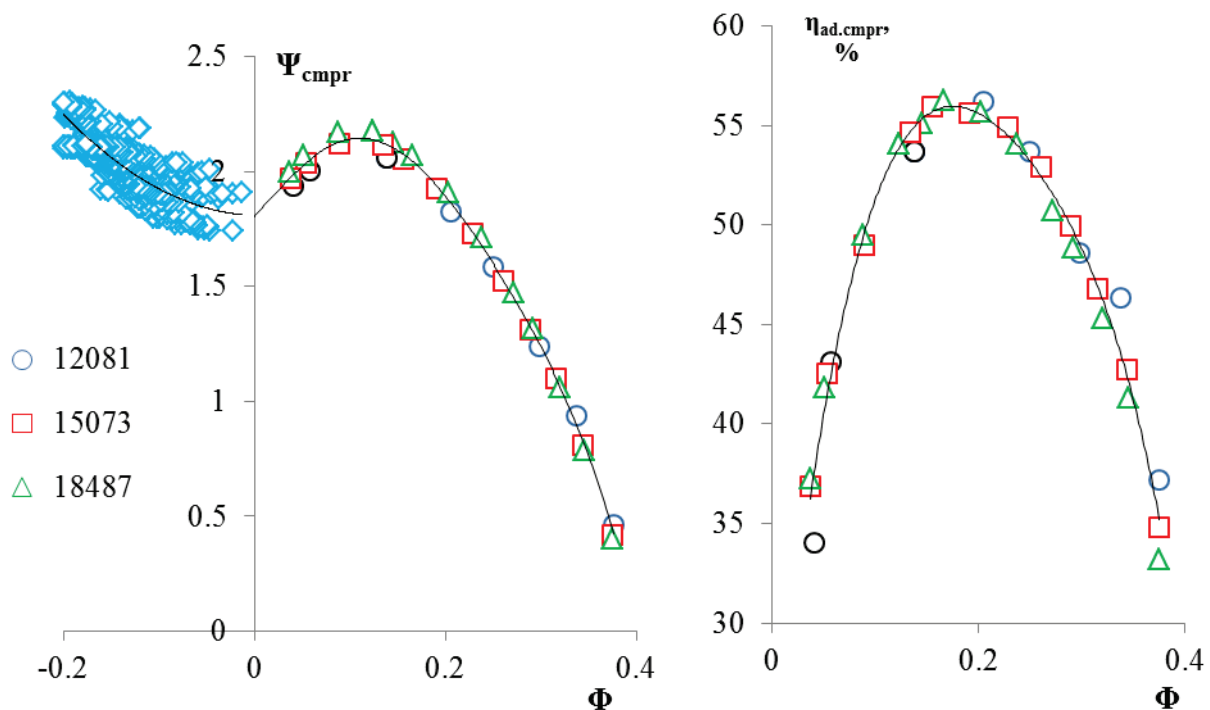


Рис. 3. Безрозмірне представлення характеристик компресора

На Рис. 4 представлено суміщення роботи системи в умовах помпажу та статичної характеристики компресора.

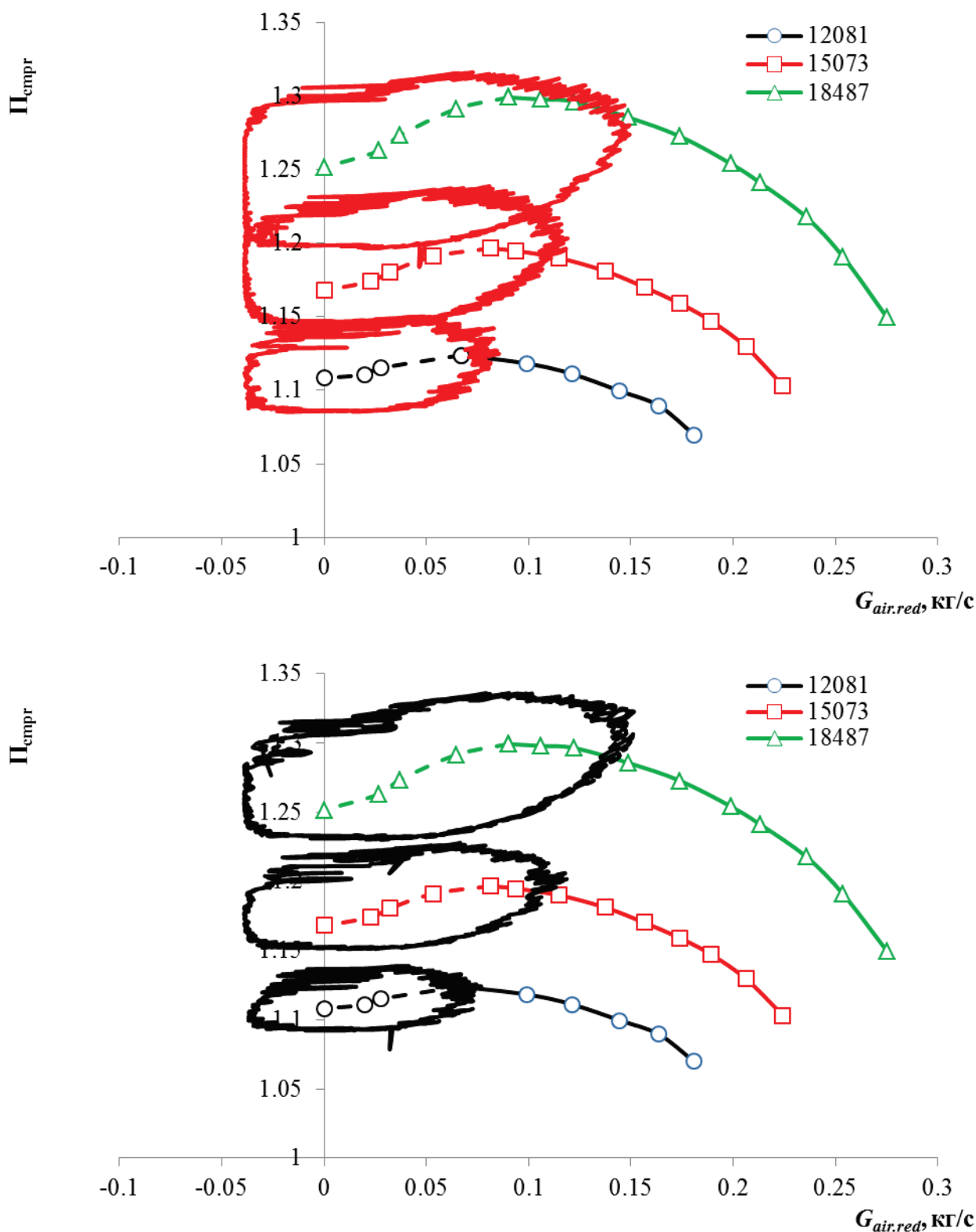


Рис. 4. Криві роботи системи в умовах помпажу
на статичній характеристиці компресора:
зверху – «помірний» помпаж, довгий нагнітальний трубопровід;
знизу – «глибокий» помпаж, короткий нагнітальний трубопровід;

Висновки

Таким чином, в ході експериментальних досліджень отримані необхідні дані для розробки математичної моделі урахування роботи відцентрового компресора в діапазоні нестабільних режимів роботи при синтезі робочого процесу ДВЗ.

Література:

1. **Day, I. J.** Stall Inception in Axial Flow Compressors. *ASME Journal of Turbomachinery*. Jan. 1993, 115(1), pp. 1-9.
2. **Fink, D. A., Cumpsty, N. A. and Greitzer, E. M.** Surge Dynamics in a Free-Spool Centrifugal Compressor System. *ASME. Journal of Turbomachinery*. 1992, 114(2), pp. 321-332.
3. **Day, I. J.** Axial Compressor Performance During Surge. *Journal of Propulsion and Power*. 1994, Vol. 10, 3, pp. 329-337.
4. **Zhao, Y., et al., et al.** Experimental investigation of transient characteristics of mild surge and diffuser rotating stall in a centrifugal compressor with vaned diffuser. *Sci. China Technol. Sci.* 2020, 63, pp. 1212-1223.

CENTRIFUGAL COMPRESSOR INSTABLE OPERATION EXPERIMENTAL RESEARCH

Minchev D. S.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

Gogorenko O. A.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

Moshentsev Y. L.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

Abstract The diagram of the research test-bench based on the centrifugal compressor for Walter 332 piston engine is presented. The test-bench different setup allows to measure the centrifugal compressor parameters in the steady operation mode as well as in all types of unstable modes: rotating stall, mild surge and deep surge. The experimental diagrams are also shown.

Keywords: centrifugal compressor, surge, rotating stall, supercharging