

бавить можливість расчета наполнения с использованием датчика массового расхода воздуха (ДМРВ), а также по методу *Alpha-N* (наполнение рассчитывается с помощью двухмерной таблицы, по одной оси которой положение дроссельной заслонки, по другой – обороты коленвала). Кроме этого, планируем добавить корректировку температуры воздуха в зависимости от температуры двигателя, поскольку ДТВ не учитывает небольшой нагрев поступающего воздуха от контакта с нагретыми патрубками впускного коллектора. Для управления актуатором РХХ в последующем планируется реализовать режим замкнутого управления с использованием ПИ-регулятора.

**Список литературы:** 1. Морозов, К. А. Токсичность автомобильных двигателей [Текст] / К. А. Морозов; 2-е изд., перераб. – М.: Легион-Автodata, 2001. – 79 с. 2. МПС3 SECU-3 / Ignition and fuel injection ECU [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://secu-3.org/>. – Название с экрана. 3. FreeEMS [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://freeems.org/>. – Название с экрана. 4. MEGASQUIRT [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://megasquirt.info/>. – Название с экрана. 5. Борщук, Я. А. Электронные и микропроцессорные системы автомобилей: учеб. пособ. [Текст] / Я. А. Борщук, В. И. Васильев. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2007. – 207 с. 6. Banish, G. Engine Management: Advanced Tuning [Text] / Greg Banish. – North Branch: CarTech, 2007 – 128 p. 7. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического управления [Текст] / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов; 4-е изд., пере-

раб. доп. – С-Пб.: Профессия, 2003. – 752 с. 8. Reif, K. Gasoline Engine Management: Systems and Components (Bosch Professional Automotive Information) [Text] / Konrad Reif. – Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. – 354 p. 9. Гирявец, А. К. Теория управления автомобильным бензиновым двигателем [Текст] / А. К. Гирявец. – М.: Стройиздат, 1997. – 161 с. 10. Smith, S. W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing [Text] / Steven W. Smith; 2-nd Ed. – San-Diego: California Technical Publishing, 1999 – 650 p. 11. Кенио, Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления [Текст] / Т. Кенио; пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 200 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Morozov, K. A. (2001). The toxicity of automobile engines (2nd ed.). Moscow: Legion-Avtodata, 79. 2. МПС3 SECU-3 / Ignition and fuel injection ECU [Virtual Resource]: Available at: <http://secu-3.org/>. 3. FreeEMS. [Virtual Resource]: Available at: <http://freeems.org/>. 4. MEGASQUIRT [Virtual Resource]: Available at: <http://megasquirt.info/>. 5. Borshhenko, Ja. A., Vasil'ev, V. I. (2007). Vehicle's electronic and microprocessor systems: study guide. Kurgan: Izd-vo Kurganskogo gos. un-ta, 207. 6. Banish, G. (2007). Engine Management: Advanced Tuning. North Branch: CarTech, 128. 7. Besekerskiy, V. A., Popov, E. P. (2003). The theory of automatic control systems (4th ed.). Sankt-Peterburg: Professija, 752. 8. Reif, K. (2015). Gasoline Engine Management: Systems and Components (Bosch Professional Automotive Information). Wiesbaden: Springer Vieweg, 354. 9. Girjavec, A. K. (1997). Theory of control of automobile gasoline engine. Moskva: Strojizdat, 161. 10. Smith, S. W. (1999). The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing (2nd ed.). San-Diego: California Technical Publishing, 650. 11. Kenio, T. (1987). Stepping motors and their microprocessor controls (per. s angl.). Moscow: Jenergoatomizdat, 200.

Поступила (received) 26.05.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Шабельников Алексей Алексеевич** – инженер-программист, тел.: 095-546-32-69; e-mail: [shabelnikov@secu-3.org](mailto:shabelnikov@secu-3.org).

**Шабельников Олексій Олексійович** – инженер-програміст, тел.: 095-546-32-69; e-mail: [shabelnikov@secu-3.org](mailto:shabelnikov@secu-3.org).

**Shabelnykov Oleksii** – software engineer, tel.: 095-546-32-69; e-mail: [shabelnikov@secu-3.org](mailto:shabelnikov@secu-3.org)

УДК 621.634:629.735.035.3'7 (045)

**М. Ю. БОГДАНОВ**

## МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТУПЕНЯ ОСЬОВОГО ВЕНТИЛЯТОРА

В статті представлено результати чисельного і параметричного досліджень ступеня осьового вентилятора, що надали змогу визначити межі його експлуатаційних режимів та провести оцінку зміни енергетичних параметрів. Розрахунки проводились при номінальному і зривному режимах та показали імпульсний характер зміни значень повного тиску  $P^*$  і осьової швидкості  $C_{сер}$ , що є свідченням пульсуючого виходу потоку із спрямляючого апарату ступеня.

**Ключові слова:** осьовий вентилятор, нестационарні характеристики, відривні течії, нерівномірність потоку, імпульсна зміна, пульсуючий потік.

**Вступ.** Характерною особливістю режиму роботи газотурбінних двигунів (ГТД) є періодична навколишня нерівномірність потоку, що обумовлена аеродинамічними слідами за елементами спрямляючого апарату осьового вентилятора [1].

Коливання лопаткових вінців ОВ обумовлені багатьма чинниками збудження потоку в ступені. Тому при дослідженні нестационарних характеристик ступенів ОВ необхідно окремо враховувати коливання лопаткових вінців та коливання потоку робочого тіла [2].

Механізм виникнення вимушених резонансних коливань, характеризується співпадінням на різних режимах роботи частот власних коливань лопаткових вінців та частот коливань періодично нерівномірного потоку [3 – 5]. Велике практичне значення представляють результати досліджень, що показують багато

компонентну складову поля коливань параметрів ступеня ОВ, яка містить не лише характеристики нерівномірності власних коливань лопаток, а також нерівномірність коливань поля потоку.

**Мета роботи.** Метою даної статті є представлення методики моделювання нестационарних характеристик ступеня ОВ.

Задачею даної статті є проведення дослідження нестационарних характеристик ступеня ОВ методами чисельної газодинаміки.

**Методика проведення чисельних експериментів.** Для проведення досліджень нестационарних характеристик ступеня в дисертаційній роботі був змодельований ступінь осьового вентилятора (ОВ), що складається з 6-ти робочих та 7-ми спрямляючих лопаток (рис. 1 зображення а) та б)).

© М. Ю. Богданов. 2015

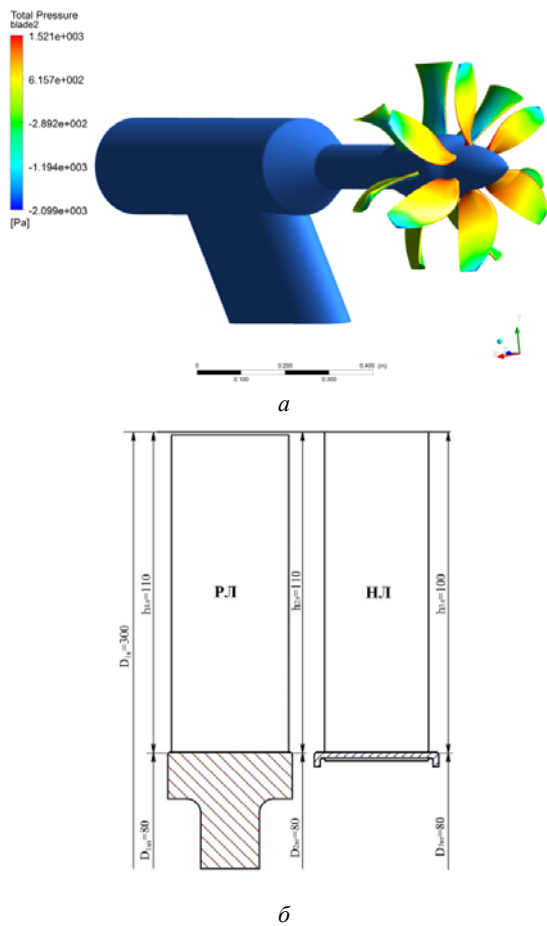


Рис. 1 – Модельний ступінь ОВ: а - об'ємне зображення; б - геометрія лопаткового вінця

Параметри змодельованого ступеня ОВ представлені в (табл. 1).

Таблиця 1 – Значення основних параметрів змодельованого ступеня ОВ

Значення основних параметрів ступеня ОВ	
$\pi_{cm}^*$	1.013
$C_{сер}, [м/с]$	35.0
$G_{cm.с}, [кг/с]$	7.32
$\eta_{cm.с}$	0,63

Під час дослідження ступеня ОВ визначались зміни значень основних показників роботи ступенів: ступінь підвищення тиску  $\pi_{cm}^*$  (рівн. 1) та адіабатичний коефіцієнт корисної дії  $\eta_{cm}^*$  (рівн. 2).

Так, степінь підвищення тиску визначається за допомогою наступної залежності [6]

$$\pi_{cm}^* = \frac{P_{2cp}^*}{P_{0cp}^*}, \quad (1)$$

де  $P_{0cp}^*$  - середнє значення повного тиску на вході в ступінь;  $P_{2cp}^*$  - середнє значення повного тиску на виході із ступеня.

Адіабатичний коефіцієнт корисної дії визначається залежністю [7, 8]

$$\eta_{cm}^* = \frac{T_{0cm}^* \left( \pi_{cm}^{*\frac{k}{k-1}} - 1 \right)}{T_{2cp}^* - T_{0cp}^*}, \quad (2)$$

де  $T_{0cm}^*$ ,  $T_{2cp}^*$  - середнє значення повної температури на вході та на виході зі ступеня.

**Обговорення результатів чисельних досліджень ступеня ОВ.** Аналіз отриманих даних дослідження показує, що при номінальному режимі роботи ступеня зміна значень повного тиску  $P^*$  та температури  $T^*$  на поверхні робочих (РЛ) і спрямляючих лопаток (СЛ) змінюється в межах  $P^* = -2,099 \cdot 10^3 \div 1,521 \cdot 10^3 [Pa]$ , відповідно, значення температури знаходиться в діапазоні  $T^* = 2,991 \cdot 10^2 \div 3,049 \cdot 10^2 [K]$ .

При зривному режимі роботи ступеня ОВ картина зміни значень параметрів повного тиску  $P^*$  та температури  $T^*$  знаходиться в межах  $P^* = -2,219 \cdot 10^3 \div 1,993 \cdot 10^3 [Pa]$  та  $T^* = 2,994 \cdot 10^2 \div 3,056 \cdot 10^2 [K]$ .

Результати дослідження ступеня ОВ, що проводилося засобами чисельного та натурального експерименту, представлені серією графіків зміни параметрів значень повного тиску  $P^*$  та осьової швидкості  $C_{сер}$  при номінальному та зривному режимах роботи ступеня [9, 10]. Отримані в дослідженні параметри адаптивної системи керування відривними течіями, порівнювались зі значеннями розподілу параметрів "базового" ступеня ОВ (рис. 2 та 3 зображення а)). Параметри ступеня ОВ були визначені, як осереднені значення зміни характеристик ступеня у відповідних реперних точках.

Відповідно до результатів дослідження, розподіл параметрів, як  $P^*$  так і  $C_{сер}$ , при номінальному режимі роботи досліджуваного ступеня ОВ характеризується високочастотними коливаннями, з частотою, що становить  $f \cong 125 [Гц]$ . Амплітуда коливань повного тиску  $P^*$  та осьової швидкості  $C_{сер}$  знаходиться в межах  $P^* = 1,346 \cdot 10^3 \div 1,347 \cdot 10^3 [Pa]$  і  $C_{сер} = 36,55 \div 36,56 [м/с]$ . Середнє значення повного тиску  $P^*$  та осьової швидкості  $C_{сер}$  складає  $P^* = 1346,84 [Pa]$  і  $C_{сер} = 36,56 [м/с]$ . При цьому значення ККД дорівнює  $\eta_{cm.с} = 0,63$ . Параметри "базового" ступеня ОВ на розрахунковому режимі (рис. 2 зображення а)) вказані в (табл. 2).

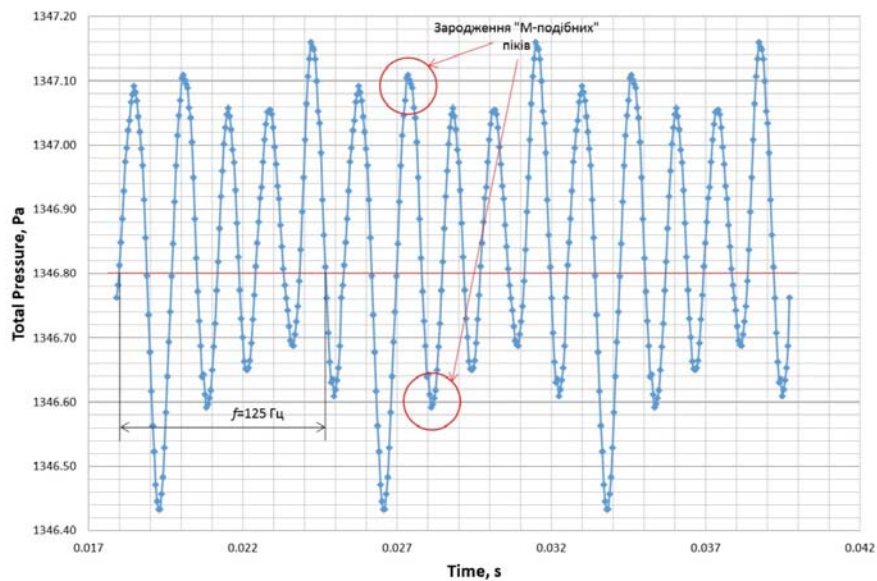
При зривному режимі роботи ступеня ОВ, зміна значень параметрів  $P^*$  та  $C_{сер}$  (рис. 2 зображення б)) характеризується появою низькочастотної компоненти розподілу параметрів з частотою, що становить  $f \cong 71,4 [Гц]$ . Амплітуда коливань значень повного тиску  $P^*$  та осьової швидкості  $C_{сер}$  знаходиться в межах

$P^* = 0,75 \cdot 10^3 \pm 2,001 \cdot 10^3$  [Pa] і  $C_{сеп} = 34,91 \div 40,08$  [м/с]. Середнє значення повного тиску  $P^*$  та осьової швидкості  $C_{сеп}$  складає  $P^* = 1375,43$  [Pa] і  $C_{сеп} = 37,5$  [м/с]. При цьому значення ККД на зривному режимі дорівнює  $\eta_{ст.с} = 0,6$ , що на 4,76 % менше ніж при номінальному режимі роботи ступеня ОВ. Параметри "базового" ступеня ОВ на зривному режимі (рис. 2 зображення а)) вказані в (табл. 2).

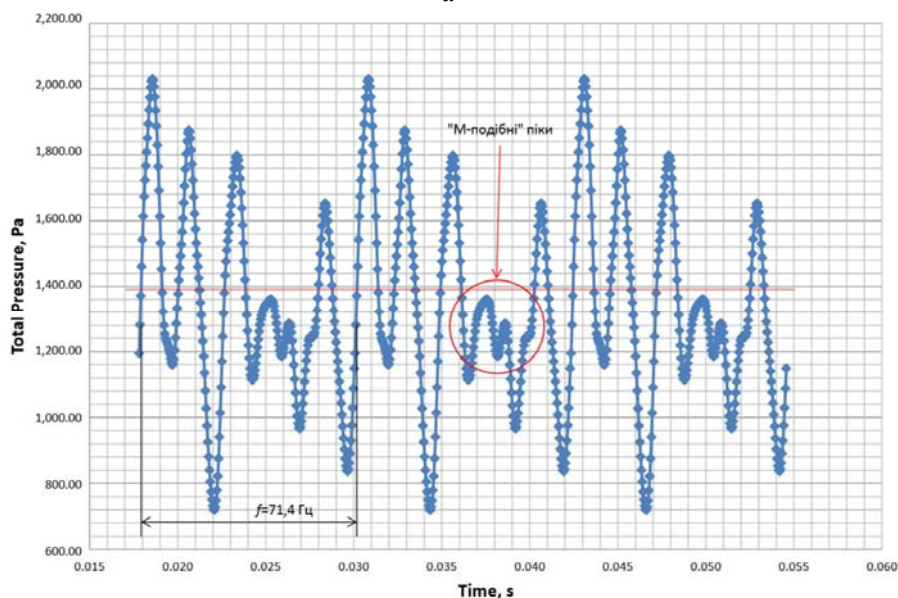
Параметри досліджуваного ступеня осьового вентилятора (ОВ) на розрахунковому та зривному режимах роботи представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Значення основних параметрів ступеня осьового вентилятора при розрахунковому та зривному режимах

Розрахунковий режим роботи ст. ОВ		Зривний режим роботи ст. ОВ	
$P^*$ , [Pa]	102671.84	$P^*$ , [Pa]	102700.43
$T^*$ , [K]	301.6	$T^*$ , [K]	302.13
$C_{сеп}$ , [м/с]	36.56	$C_{сеп}$ , [м/с]	37.5
$G_{ст.с}$ , [кг/с]	7.32	$G_{ст.с}$ , [кг/с]	6.03
$M_{ст.с}$ , [N·m]	13.41	$M_{ст.с}$ , [N·m]	16.15
$\eta_{ст.с}$	0,63	$\eta_{ст.с}$	0,6



а



б

Рис. 2 – Зміна значень повного тиску при: а - номінальному; б - зривному режимах роботи "базового" ступеня ОВ

З графіків видно, що розподіл значень повного тиску  $P^*$  (рис. 2 зображення а)) та осьової швидкості  $C_{сеп}$  (рис.3 зображення а)) на номінальному і зривному (рис.2 зображення б)) та (рис. 3 зображення б))

режимах за часом має синусоїдальний характер. Характерною особливістю розподілу параметрів при номінальному режимі роботи ступеня ОВ є формування "М-подібних" піків, що більш інтенсивно проявляють-



ся при зривному режимі роботи ступеня. Також слід зауважити, що при зривному режимі роботи ступеня ОВ почала проявлятися низькочастотна компонента розподілу параметрів з частотою коливань  $f \cong 71,4$  [Гц]. При цьому зміна середніх значення розподілу параметрів

повного тиску  $P^*$  та осьової швидкості  $C_{сер}$  призвела до зміни інтенсивності коливань.

Картину ліній току та вихроутворень при номінальному та зривному режимах роботи досліджуваного ступеня осевого вентилятора представлено на (рис. 4).

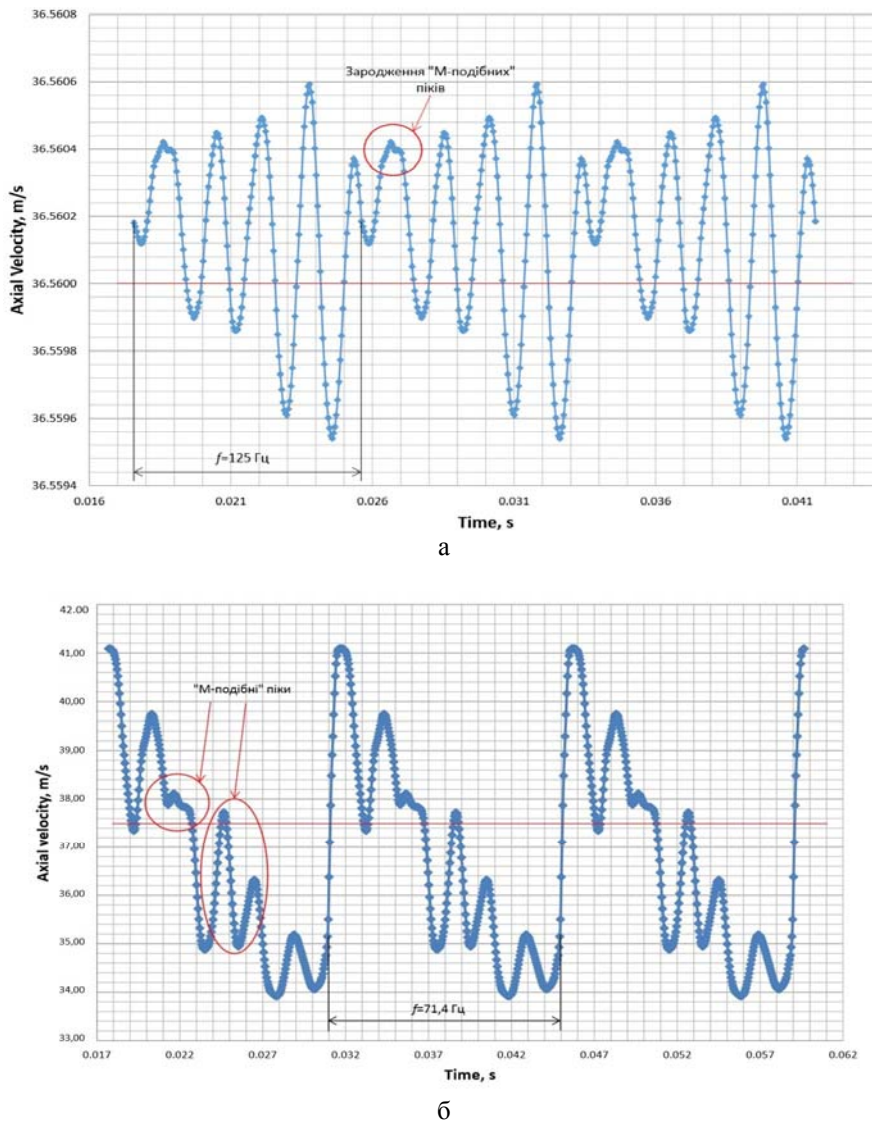


Рис. 3 – Зміна значень осьової швидкості при: а – номінальному; б – зривному режимах роботи "базового" ступеня ОВ

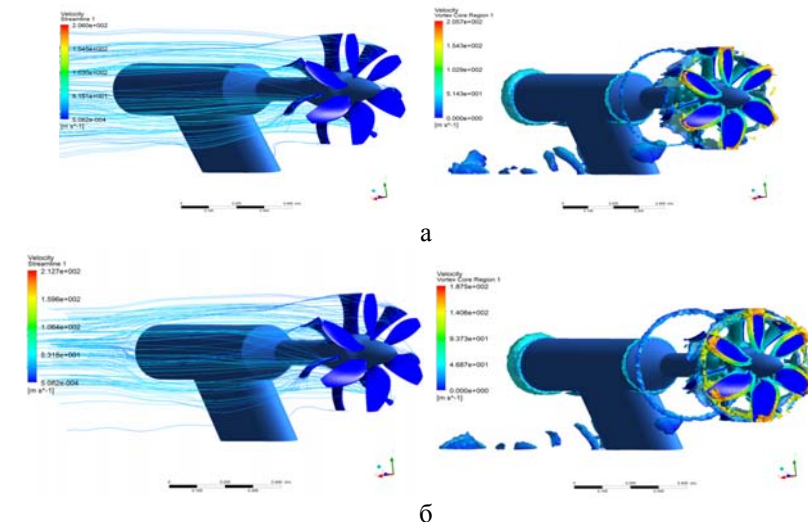


Рис. 4 – Лінії току та зони вихроутворення на: а - номінальному; б - зривному режимах роботи ступеня ОВ

**Висновки.** Отже, дослідження "базового" ступеня осевого вентилятора показало, що при номінальному режимі роботи розподіл параметрів повного тиску  $P^*$  та осевої швидкості  $C_{сер}$  характеризується високочастотними коливаннями, з частотою коливань  $f \cong 125$  [Гц]. Як вже зазначалось раніше, амплітуда розподілу параметрів  $P^*$  та  $C_{сер}$  знаходиться в межах  $P^* = 1,346 \cdot 10^3 \div 1,347 \cdot 10^3$  [Pa] і  $C_{сер} = 36,55 \div 36,56$  [м/с]. Особливою відмінністю роботи ступеня ОВ на номінальному режимі є періодичне формування "М-подібних" піків. При цьому ККД ступеня ОВ  $\eta_{см.с} = 0,63$ .

Результати дослідження зривного режиму роботи "базового" ступеня осевого вентилятора характеризується появою низькочастотної компоненти розподілу параметрів з частотою, що становить  $f \cong 71,4$  [Гц]. Амплітуда коливань значень повного тиску  $P^*$  та осевої швидкості  $C_{сер}$  знаходиться в межах  $P^* = 0,75 \cdot 10^3 \div 2,001 \cdot 10^3$  [Pa] і  $C_{сер} = 34,91 \div 40,08$  [м/с]. При цьому, зміна режиму роботи, призвела до зміни значення  $\eta_{см.с} = 0,6$ , що на 4,76 % менше, ніж при номінальному режимі роботи ступеня ОВ.

**Список літератури:** 1. Ших-И, Пай. Введение в теорию течения сжимаемой жидкости [Текст] / Пай Ших-И. - М.: ИЛ, 1962. - 410 с. 2. Белоцерковский, С. М. Аэродинамические силы, действующие на решетку профилей при нестационарном обтекании [Текст] / С. М. Белоцерковский, А. С. Гиневский, Я. Е. Полонский // Промышленная аэродинамика: сб. науч. тр. ЦАГИ. - М.: Оборонгиз, 1961. - № 20. - С. 6 - 36.3. Кукинов, А. Г. Работа лопаточной машины при неравномерном распределении по окружности полного напора во входном сечении [Текст] / А. Г. Кукинов // Труды ЦАГИ. - 1961. - № 827. 4. Кулагина, В. А. Экспериментальное исследование влияния характеристик осевого компрессора и граничных условий на резонансные колебания рабочих лопаток [Текст] / В. А. Кулагина // Проблемы прочности. Институт проблем прочности АН УССР. - К.:

Наук. думка. - 1974. - № 10. - С. 67 - 71. 5. Кулагина, В. А. Экспериментальное исследование колебаний плоской решетки [Текст] / В. А. Кулагина // Лопаточные машины и струйные аппараты: сб. ст. - М.: Машиностроение, 1966. - № 1. - С. 98 - 120. 6. Стечкин, Б. С., Казаджин, П. К., Алексеев, Л. П. Теория реактивных двигателей [Текст]. - М.: Оборониздат, 1956. - 533 с. 7. Терещенко, Ю. М., Бойко, Л. Г., Дмитриев, С. О. Теория тепловых двигателей [Текст]. - К.: Вища шк., 2001. - 382 с. 8. Панин, В. В. Методика определения КПД компрессора в процессе его испытания импульсным способом [Текст]. - В кн.: Диагностирование и прогнозирование технического состояния газотурбинных двигателей: Сборник научных трудов. - Киев: КИИГА., 1985. - с. 130-134. 9. Envia, E. NASA Open Rotor Noise Research [Текст] / E. Envia. - NASA Glenn Research Center U.S.A.: Institute of Aviation, Warsaw, Poland October 7-8, 2010. 10. Julian, F. Snecma veut faire voler un moteur "open rotor" [Текст] / F. Julian // AIR&COSMOS, 2014. - № 2321. - С. 70.

**Bibliography (transliterated):** 1. Shih-I, Pai. (1962). Vvedenie v teoriyu techeniya szhimaemoj zhidkosti [Introduction to the theory of compressible flow]. Moscow: IL, 410. 2. Belocerkovskij, S. M. (1961). Aerodinamicheskie sily, dejstvujushhie na reshetku profilej pri nestacionarnom obtekanii [Aerodynamic forces that are influence to blades row during transient flow]. Moscow: Oborongiz, 6-36.3. Kukinov, A. G. (1961). Rabota lopatochnoj mashiny pri neravnomernom raspredelenii po okruzhnosti polnogo napora vo vhodnom sechenii [Operation of a blades machine during uneven total head distribution in the inlet section]. Trudy CAGI, 827. 4. Kulagina, V. A. (1974). Jeksperimental'noe issledovanie vlijanija harakteristik oseвого kompressora i granichnyh uslovij na rezonansnye kolebanija rabochih lopatok [Experimental investigation of axial compressor characteristics and boundary conditions influence for resonance oscillation of an operational blades]. Kyiv: Naukova dumka, 67-71.5. Kulagina, V. A. (1966). Jeksperimental'noe issledovanie kolebanij ploskoj reshetki [Experimental investigation of planar grating oscillation]. Moscow: Lopatochnye mashiny i strujnye apparaty, 98-120. 6. Stechkin, B. S., Kazadzhin, P. K., Alekseev, L. P. (1956). Teorija reaktivnyh dvigatelej [Theory of jet engines]. Moscow: Oborongizdat, 533. 7. Tereshhenko, J. M., Bojko, L. G., Dmitriev, S. O. (2001). Teorija teplovyh dviguniv [Theory of heat engines]. Kyiv: Vishha shkola, 382. 8. Panin, V. V. (1985). Metodika opredelenija KPD kompressora v processe ego ispytaniya impul'snym sposobom [Methodology of compressor efficiency definition during its testing by pulse method]. Kiev: KIIGA, 130 - 134. 9. Envia, E. (2010). NASA Open Rotor Noise Research. NASA Glenn Research Center U.S.A.: Institute of Aviation, 7-8. 10. Julian, F. (2014). Snecma veut faire voler un moteur "open rotor". AIR&COSMOS, 70.

Надійшла (received) 27.05.2015

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Богданов Микола Юрійович** – аспірант, Національний авіаційний університет, кафедра авіаційних двигунів; тел.: 097-985-21-12, e-mail: [BogdanovNY@gmail.com](mailto:BogdanovNY@gmail.com)

**Богданов Николай Юрьевич** – аспірант, Национальный авиационный университет, кафедра авиационных двигателей; тел.: 097-985-21-12, e-mail: [BogdanovNY@gmail.com](mailto:BogdanovNY@gmail.com)

**Bohdanov Mykola** – postgraduate student, National Aviation University, department of aircraft engines; tel.: 097-985-21-12, e-mail: [BogdanovNY@gmail.com](mailto:BogdanovNY@gmail.com)

УДК 669.295

**Т. Б. ЯНКО, О. В. ОВЧИННИКОВ**

#### РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ КОМПЛЕКСНОГО ЛЕГУВАННЯ РІДКІСНИХ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛІВ В ПРОЦЕСІ ВІДНОВЛЕННЯ

Проведений аналіз виробництва та визначені основні проблеми легування сплавів титану та цирконію. Проведено дослідження з розробки технології комплексного легування рідкісних тугоплавких металів титану та цирконію. Проведено термодинамічний аналіз для систем легування титану та цирконію. Визначені основні реакції процесів відновлення. Розроблено конструкції апаратів відновлення тетрахлориду цирконію та суміші тетрахлоридів титану та ванадію.

**Ключові слова:** цирконій, легувальні елементи, титан, алюміній, ванадій, відновлення, сплав, технологія, реакційна маса, апарат

© Т. Б. Янко, О. В. Овчинников, 2015