

УДК 62-762

С.Б. РЕЗНИК, Е.А. БАНДУРКО

ГП “Ивченко-Прогресс”, Украина

РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ЛАБИРИНТНЫХ УПЛОТНЕНИЙ

Приведены результаты экспериментального и расчетного исследования расходных характеристик разных типов лабиринтных уплотнений, используемых в авиационных двигателях. Экспериментальные исследования проводились на стенде путём продувки как гладких прямоточных, так и гладких ступенчатых лабиринтных уплотнений. Для расчётного исследования был создан ряд двумерных осесимметричных CFD-моделей различных типов лабиринтных уплотнений. Выполнен сравнительный анализ расчётных и экспериментальных данных. Результаты выполненного экспериментально-расчётного анализа позволяют более точно проводить гидравлические расчеты систем охлаждения газовых турбин.

Ключевые слова: лабиринтное уплотнение, коэффициент расхода, турбина.

Введение

Одной из основных задач при создании газотурбинных двигателей (ГТД) является задача повышения эффективности его узлов, и как следствие, необходимость снижения непроизводительных утечек воздуха, отбираемого в компрессоре. На охлаждение турбины, наддува опорках турбин и компенсации осевых усилий на подшипники.

В настоящее время для решения этих задач широко используются различные типы лабиринтных уплотнений, представленные на рис. 1, где:

- 1 – ступенчатое лабиринтное уплотнение с сотовой дорожкой на статоре;
- 2 – прямоточное лабиринтное уплотнение с сотовой дорожкой на статоре;
- 3 – ступенчатое лабиринтное уплотнение с прирабатываемым покрытием ;
- 4 – прямоточное лабиринтное уплотнение с прирабатываемым покрытием на статоре.

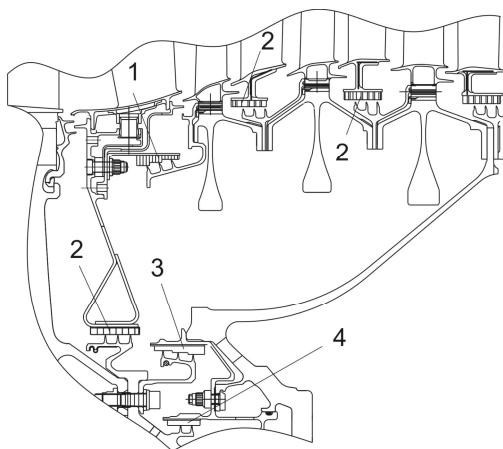


Рис. 1. Различные типы лабиринтных уплотнений

Характеристики течений и утечек через лабиринтные уплотнения были исследованы различными авторами [1 – 3].

Для определения расхода утечки через лабиринтные уплотнения на этапе проектирования системы охлаждения используются различные подходы.

1. Методика исследования расходных характеристик лабиринтных уплотнений

На предприятии ГП “Ивченко-Прогресс” используются два подхода к исследованию расходных характеристик лабиринтных уплотнений: экспериментальный и расчётный.

Для экспериментальной оценки расходных характеристик лабиринтных уплотнений используются имеющиеся на нашем предприятии стенды (рис. 2 и 3), на которых моделируются геометрические характеристики и рабочие условия исследуемых лабиринтных уплотнений.

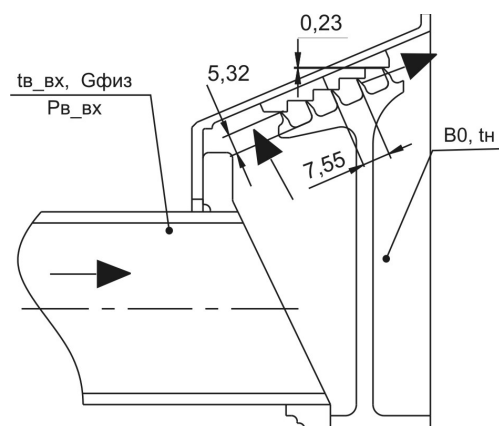


Рис. 2. Установка для продувки моделей ступенчатых лабиринтных уплотнений

При проведении экспериментов (продувок) моделей лабиринтных уплотнений измеряются давления на входе и выходе, температуры воздуха на входе и выходе из лабиринтного уплотнения, физический расход воздуха через лабиринтное уплотнение.

Особое внимание уделяется точному определению зазоров в испытываемом лабиринтном уплотнении.

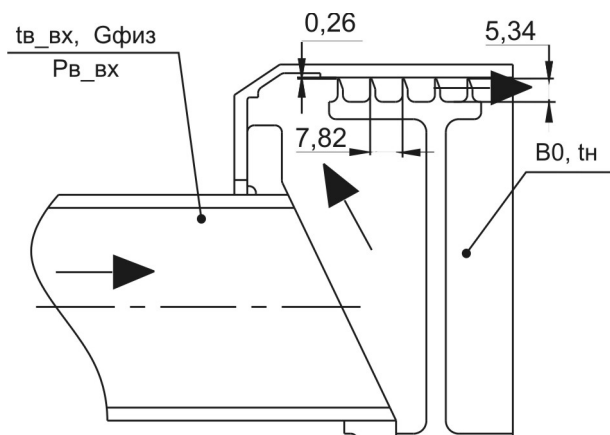


Рис. 3. Установка для продувки прямоточных лабиринтных уплотнений

Кроме указанных установок была создана установка для продувки 3, 6 и 9-ти зубых прямоточных лабиринтов диаметром 250 мм с различным шагом зубьев лабиринта.

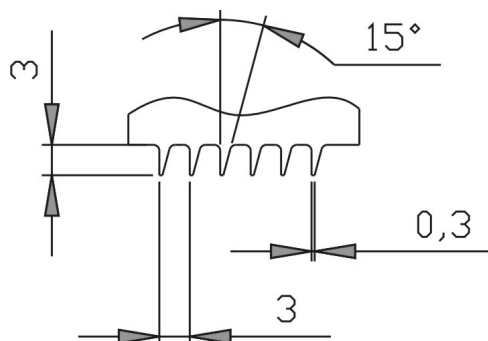


Рис. 4. Шестизубый прямоточный лабиринт с шагом зубьев 3 мм

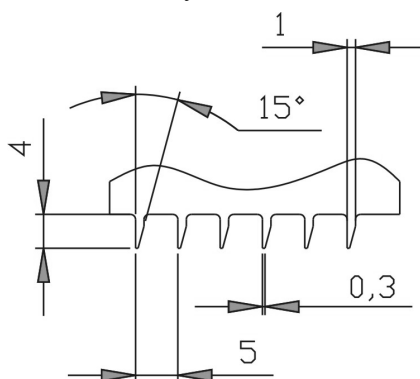


Рис. 5. Шестизубый прямоточный лабиринт с шагом зубьев 5 мм

Геометрические характеристики данных лабиринтов представлены на рис. 4 и 5.

В процессе эксперимента варьируются перепады давлений и значения радиального зазора для данной модели лабиринтного уплотнения.

По результатам экспериментальных продувок определяются коэффициенты расхода для данной модели лабиринтного уплотнения.

Расчет идеального расхода воздуха через лабиринтное уплотнение ($G_{в\text{ид}}$) проводился с использованием формулы А.Стодола:

$$G_{в\text{ид}} = \sqrt{\frac{P_{вх}^2 - P_{вых}^2}{Z \cdot R \cdot T_{вх}}} \cdot F_{вх} \cdot F_{вых} \quad (1)$$

Коэффициент расхода лабиринтного уплотнения (μ_S) зависит от многих факторов и определялся на основании экспериментальных данных по продувкам (физическому расходу $G_{в\text{физ}}$) разных типов лабиринтных уплотнений в зависимости от зазора и перепада давления на лабиринтном уплотнении:

$$\mu_S = \frac{G_{в\text{физ}}}{G_{в\text{ид}}} \quad (2)$$

В результате экспериментальных продувок получены данные по расходным характеристикам прямоточных и ступенчатых лабиринтов с гладким и сотовым покрытием статора, на основании которых создана база экспериментальных данных коэффициентов расхода лабиринтных уплотнений, позволяющая в результате интерполяции выполнить достаточно точные расчёты расходов утечек для различных типов лабиринтных уплотнений газотурбинных двигателей. Использование в проекторочных расчетах коэффициентов расхода лабиринтных уплотнений возможно при сохранении геометрического подобия проектируемого и исследованной экспериментально модели лабиринтного уплотнения.

Влияние вращения ротора на расход утечки через лабиринтное уплотнение учитывается по данным [1]

Другим подходом для получения значений расходов утечки через лабиринтное уплотнение является использование CFD-методов для расчёта вязких сжимаемых течений.

2. Результаты исследований расходных характеристик лабиринтных уплотнений

Для определения расходных характеристик лабиринтных уплотнений расчётным путём был создан ряд двумерных осесимметричных CFD-моделей различных типов лабиринтных уплотнений и выполнены расчёты как с различным перепадом дав-

лений на лабиринтном уплотнении при фиксированном зазоре, так и с различным зазором при постоянном перепаде давлений на уплотнении.

Модель одного из вариантов CFD-расчёта ступенчатого 5-ти зубого лабиринтного уплотнения представлена на рис. 6.

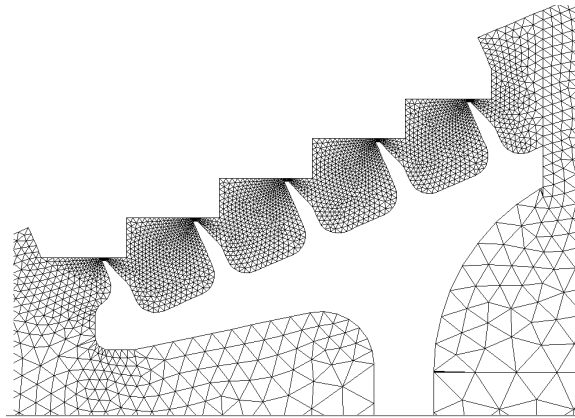


Рис. 6. Сетка для CFD-расчёта

Схема распределения векторов давлений в полостях между зубьями ступенчатого лабиринтного уплотнения с гладкой стенкой представлена на рис. 7.

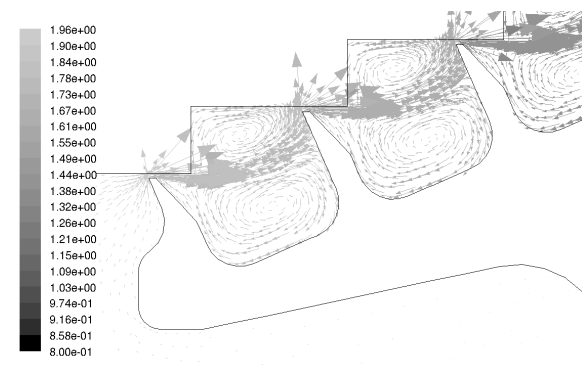


Рис. 7. Векторы распределения давлений в расчётной области

В результате ряда CFD-расчётов были получены расчётные данные по величине коэффициента расхода гладкого ступенчатого пятизубого лабиринтного уплотнения (μ_S) с радиальным зазором 0,23 мм в зависимости от перепада давления на входе и выходе из лабиринтного уплотнения.

Результаты сравнительного анализа расчётных данных лабиринтного уплотнения в зависимости от перепада давления на уплотнении с экспериментально полученными коэффициентами расхода ступенчатого пятизубого лабиринтного уплотнения с радиальным зазором 0,23 мм и гладкой стенкой представлены на рис. 8.

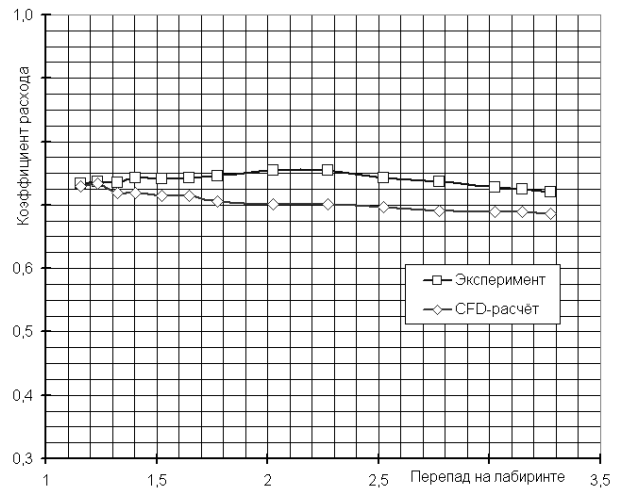


Рис. 8. Коэффициенты расхода 5-ти зубого ступенчатого лабиринтного уплотнения с гладкой стенкой

Результаты сравнительного анализа расчётных данных лабиринтного уплотнения в зависимости от перепада давления на уплотнении с экспериментально полученными коэффициентами расхода прямооточного пятизубого лабиринтного уплотнения с радиальным зазором 0,26 мм и гладкой стенкой представлены на рис. 9.

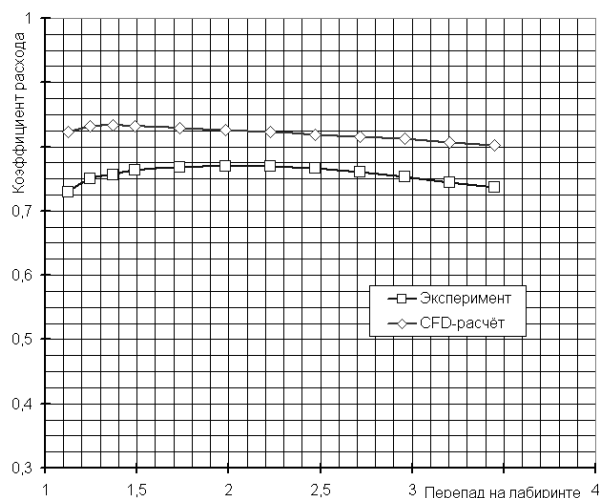


Рис. 9. Коэффициенты расхода прямооточного 5-ти зубого лабиринтного уплотнения с гладкой стенкой

Модель CFD-расчёта прямооточного 6-ти зубого лабиринтного уплотнения с шагом зубьев 3 мм представлена на рис. 10, схема распределения векторов давлений в полостях между зубьями на рис. 11.

Результаты сравнительного анализа расчётных и экспериментальных данных по расходным характеристикам 6-ти зубого лабиринтного уплотнения с шагом зубьев 3 мм при постоянном перепаде на лабиринтном уплотнении равном 2 в зависимости от

радиального зазора в лабиринтном уплотнении представлены на рис. 12.

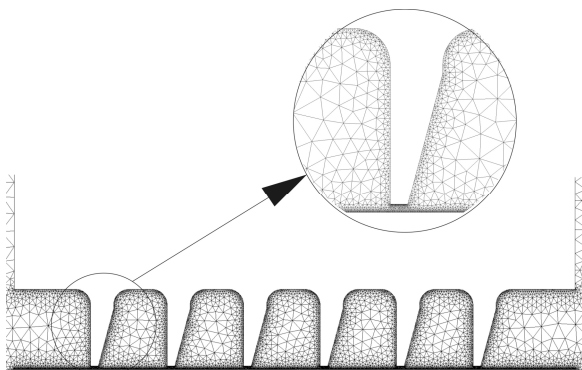


Рис. 10. Сетка для CFD-расчёта прямоточного 6-ти зубого лабиринтного уплотнения с шагом зубьев 3 мм

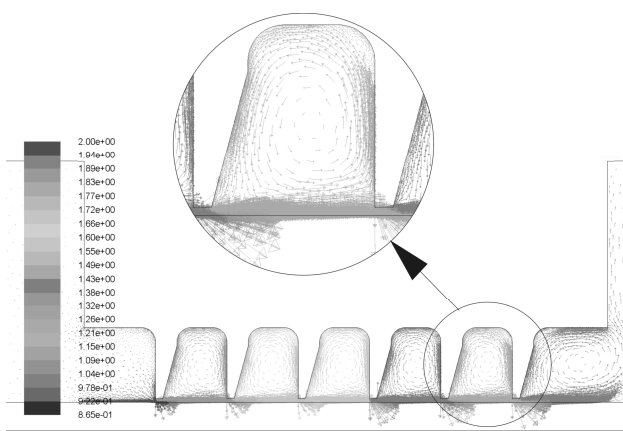


Рис. 11. Векторы распределения давлений в расчётной области 6-ти зубого лабиринтного уплотнения с шагом зубьев 3 мм

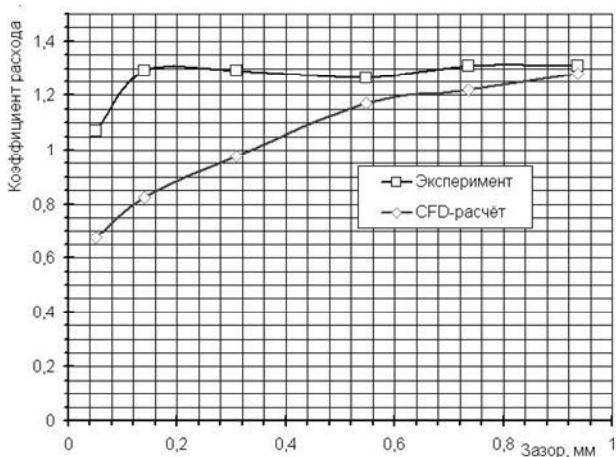


Рис. 12. Коэффициенты расхода прямоточного 6-ти зубого лабиринтного уплотнения с шагом зубьев 3 мм

Модель CFD-расчёта прямоточного 6-ти зубого лабиринтного уплотнения с шагом зубьев 5 мм представлена на рис. 13, схема распределения векторов давлений в полостях между зубьями на рис. 14.

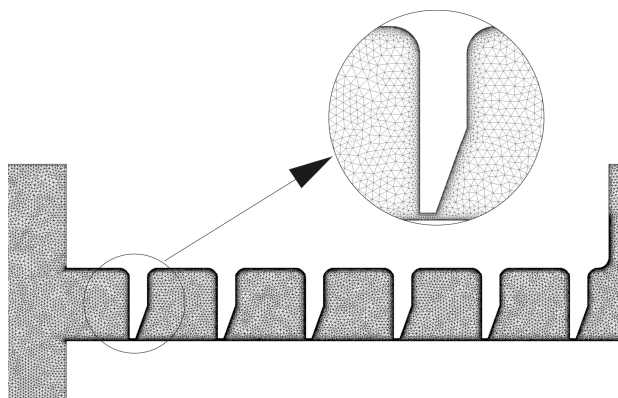


Рис. 13. Сетка для CFD-расчёта прямоточного 6-ти зубого лабиринтного уплотнения с шагом зубьев 5 мм

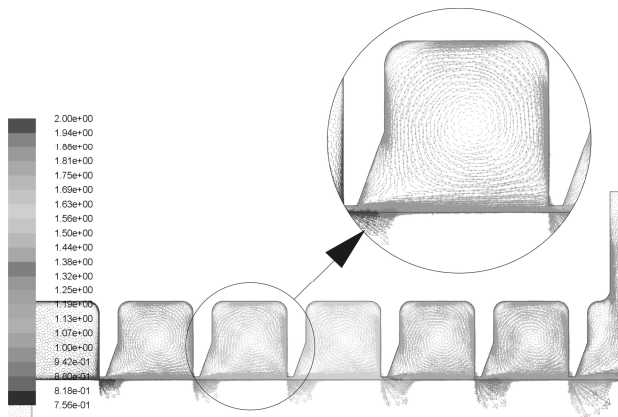


Рис. 14. Векторы распределения давлений в расчётной области 6-ти зубого лабиринтного уплотнения с шагом зубьев 5 мм

На рис. 15 представлены результаты сравнительного анализа расчётных и экспериментальных данных по расходным характеристикам 6-ти зубого лабиринтного уплотнения с шагом зубьев 5 мм при постоянном перепаде на лабиринтном уплотнении равном 2 в зависимости от радиального зазора в лабиринтном уплотнении.

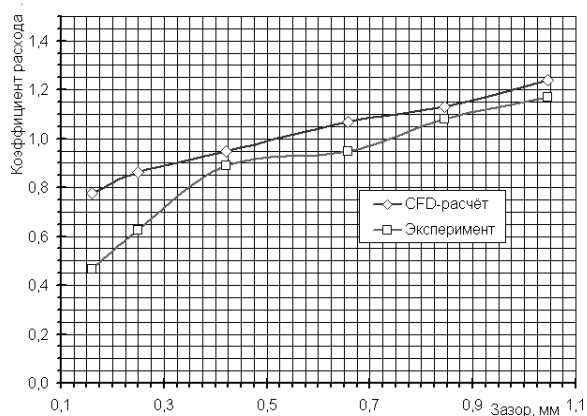


Рис. 15. Коэффициенты расхода прямоточного 6-ти зубого лабиринтного уплотнения с шагом зубьев 5 мм

Были выполнены расчеты для различных моделей лабиринтных уплотнений. Результаты расчетов и эксперимента не всегда коррелируют с достаточной точностью.

Это может быть вызвано тем, что расчеты структуры течений с сильными повторяющимися сложными отрывными зонами, характерными для течений в лабиринтных уплотнениях выполняются в рамках RANS численных CFD-моделей, не обеспечивающих достаточную точность оценки расхода.

Заключение

Представлены подходы, принятые на предприятии ГП «Ивченко-Прогресс» для исследования расходных характеристик лабиринтных уплотнений.

Описаны экспериментальный и расчетные методы расчета расхода утечки.

Выполнено сопоставление расчетных и экспериментальных данных, результаты расчетов и эксперимента не всегда коррелируют с достаточной точностью.

Необходимо продолжить обобщение базы имеющихся экспериментальных данных и выполнить дополнительные продувки лабиринтных уп-

лотнений для создания достоверных корреляционных зависимостей расчета различных типов лабиринтных уплотнений систем охлаждения турбин.

Необходимо продолжить поиск более точных CFD-моделей, моделей турбулентности для расчёта структуры течений с сильными повторяющимися сложными отрывными зонами, характерными для течений в лабиринтных уплотнениях.

CFD-расчеты должны быть верифицированы по результатам эксперимента.

Литература

1. Komotory, K. *Leakage characteristics of labyrinth seals with high rotating speed [Text]* / K. Komotory, K. Miyake // *Tokyo Joint Gas Turbine Congress*. – 1977. – P. 30-38.
2. Willenborg, K. *Effects of Reynolds number and pressure ratio on leakage loss and heat transfer in a stepped labyrinth seal [Text]* / K. Willenborg, S. Kim, S. Wittig // *ASME Turbo Expo*. – 2001. – P. 121-125.
3. Miyake, K. *Leakage Characteristics of Rotating Stepped Labyrinth Gas Seals [Text]* / K. Miyake, E. Watanabe, I. Ariga // *Society of Automotive Engineers, Inc*. – 1986. – P. 18-25.

Поступила в редакцию 30.05.2013, рассмотрена на редколлегии 17.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры В.Н. Доценко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РІЗНИХ ТИПІВ ЛАБІРИНТОВИХ УЩІЛЬНЕНЬ

С.Б. Резнік, Є.О. Бандурко

Наведено результати експериментального і розрахункового дослідження витратних характеристик різних типів лабиринтових ущільнень, що використовуються в авіаційних двигунах. Експериментальні дослідження проводилися на стенді шляхом продувки як гладких прямокутних, так і гладких східчастих лабиринтових ущільнень. Для розрахункового дослідження було створено низку двовимірних осесиметричних CFD-моделей різних типів лабиринтових ущільнень. Виконано порівняльний аналіз розрахункових та експериментальних даних. Результати виконаного експериментально розрахункового аналізу дозволяють найточніше проводити гідравлічні розрахунки систем охолодження газових турбін.

Ключові слова: лабиринтове ущільнення, коефіцієнт витрати, турбіна.

SETTLEMENT AND EXPERIMENTAL EVALUATION DIFFERENT TYPES OF LABYRINTH SEALS

S.B. Riznyk, E.A. Bandurko

The results of experimental and computational studies of flow characteristics of different types of labyrinth seals used in aircraft engines. Experimental studies were conducted on the stand by blowing a smooth straight-flow and smooth stepped labyrinth seals. For the design study created a number of two-dimensional axisymmetric CFD-models of various types of labyrinth seals. A comparative analysis of the calculated and experimental data. Results of executed experimentally settlement analysis allow to carry out more precisely hydraulic calculations of systems of cooling of gas turbines.

Keywords: labyrinth seals, coefficient of expense, turbine.

Резнік Сергей Борисович – начальник РЭБ турбин, ведущий конструктор ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: 03504@ivchenko-progress.com.

Бандурко Евгений Александрович – инженер-конструктор 1 категории ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: 03504@ivchenko-progress.com.