

**О. Ю. ЧЕРНОУСЕНКО, Д. В. РИНДЮК, В. А. ПЕШКО**

### **АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ПРОДОВЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РОТОРА СЕРЕДНЬОГО ТИСКУ З УРАХУВАННЯМ ТРІЩИН КРИТИЧНОГО РОЗМІРУ**

В роботі приведено обґрунтування допустимості подальшої експлуатації ротора середнього тиску турбіни К-200-130-3 енергоблоку № 9 Луганської ТЕС з урахуванням критичного розміру тріщин, що виникли в експлуатаційний період. Розглянуто проведення та результати ряду досліджень, спрямованих на аналіз можливості продовження експлуатації даного обладнання після проведення проточки радіальних канавок різної глибини в місця виникнення тріщин. Також надано прогноз можливості продовження розвитку тріщин в канавках. Для обґрунтування допустимості подальшої експлуатації ротора середнього тиску турбіни, проводилися розрахункові експерименти з використанням математичного моделювання, по визначенню теплового, напружено-деформованого стану та тривалості міцності досліджуваного об'єкта. Вирішено крайову задачу нестационарної теплопровідності для стаціонарного та основних пускових режимів паротурбінної установки, дискретизація розрахункової області проведена на основі методу скінченних елементів. Розрахунок напружено-деформованого стану ротора середнього тиску виконано за сумісної дії температурних напружень, градієнтів температурного поля, відцентрових сил інерції та напружень від тиску. Встановлено, що при роботі на напівпікових режимах, існує можливість підвищення залишкового ресурсу після виконання конструктивно-ремонтних заходів, а саме вирізання металу поверхневого шару теплових канавок на допустиму величину. Також, на конкретному прикладі, доведено недоцільність глибокої, понад 18 мм, вибірки металу теплових канавок.

**Ключові слова:** парова турбіна, ротор середнього тиску, режими експлуатації, тепловий стан, напружено-деформований стан, теплові канавки, тріщини.

**О. Ю. ЧЕРНОУСЕНКО, Д. В. РЫНДЮК, В. А. ПЕШКО**

### **АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОДЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ РОТОРА СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ С УЧЕТОМ ТРЕЩИН КРИТИЧЕСКОГО РАЗМЕРА**

В работе приведены обоснования допустимости дальнейшей эксплуатации ротора среднего давления турбины К-200-130-3 энергоблока № 9 Луганской ТЭС с учетом критического размера трещин, возникших в эксплуатационный период. Рассмотрено проведение и результаты ряда исследований, направленных на анализ возможности продления эксплуатации данного оборудования после проведения проточки радиальных канавок различной глубины в местах возникновения трещин. Также предоставлено прогноз возможности продолжения развития трещин в канавках. Для обоснования допустимости дальнейшей эксплуатации ротора среднего давления турбины, проводились расчетные эксперименты с использованием математического моделирования, по определению теплового, напряженно-деформированного состояния и длительной прочности исследуемого объекта. Решено краевую задачу нестационарной теплопроводности для стационарного и основных пусковых режимов паротурбинной установки, дискретизация расчетной области проведена на основе метода конечных элементов. Расчет напряженно-деформированного состояния ротора среднего давления выполнен с учетом совместного действия температурных напряжений, градиентов температурного поля, центробежных сил инерции и напряжений от давления. Установлено, что при работе на полупиковых режимах, существует возможность повышения остаточного ресурса после выполнения конструктивно-ремонтных мероприятий, а именно вырезания металла поверхностного слоя тепловых канавок на допустимую величину. Также, на конкретном примере, доказано нецелесообразность глибокой, более 18 мм, выборки металла тепловых канавок.

**Ключевые слова:** паровая турбина, ротор среднего давления, режимы эксплуатации, тепловое состояние, напряженно-деформированное состояние, тепловые канавки, трещины.

**O. CHERNOUSENKO, D. RINDYUK, V. PESHKO**

### **ANALYSIS OF THE OPPORTUNITY TO EXTEND THE OPERATION OF THE INTERMEDIATE PRESSURE ROTOR WITH CRITICAL SIZE CRACKS**

The paper shows the validity of the re-extension of operation-time of the intermediate pressure rotor of the K-200-130-3 turbine unit number 9 of the Luhansk TPP, with taking into account the critical size of the cracks that arose during the exploitation period. It was considered the conduct and results of several studies that were aimed to analyze the possibility of extending the operation-time of the equipment after conducting grooving of different depths radial grooves in places of cracks arising. The forecast of the possibility of continuation of cracks in the grooves is also provided. For justification of the possibility of further operation of the intermediate-pressure rotor of the turbine, computational experiments were carried out. Methods of mathematical modeling were used to determine the thermal, strain-stress state and long-term strength of the investigated object. The boundary value problem of non-stationary thermal conductivity for the stationary and main launch modes of the steam turbine installation is solved. The sampling of the calculated area is based on the finite element method. The calculation of the strain-stress state of the intermediate pressure rotor is made by the joint action of temperature stresses, temperature field gradients, centrifugal forces of inertia and stresses from pressure. It has been established, that when working in semi-peak modes, it is possible to increase the residual service life-time after carrying out constructive-repair measures, namely, cutting metal surface layer of thermal grooves to the admissible value. Cutting metal of the surface layer of intermediate-pressure rotor thermal grooves of 18 mm gives an opportunity to increase the residual service life-time and extend the exploitation. Also, on a concrete example, it has been proven inexpedient to deep, more than 18 mm, cutting metal into thermal grooves.

**Key words:** steam turbine, intermediate pressure rotor, operating modes, thermal state, strain-stress state, thermal grooves, cracks.

## Вступ

Більшість українських електростанцій було побудовано ще в середині XX століття, а заміна їх основного енергетичного обладнання на нове проводилася лише частково. Серйозною проблемою сучасної енергетики України є значна кількість енергоблоків ТЕС, які на сьогоднішній день відпрацювали свій парковий ресурс.

Стратегічною задачею енергетичної галузі України є прийняття рішення про продовження експлуатації енергетичного обладнання пилувугільних електростанцій після досягнення ними паркового ресурсу. Згідно нормативної документації [1] парковий ресурс енергоблоків потужністю 200–300 МВт, які складають основу генерації на ТЕС, дорівнює 200–220 тис. г. при нормованому числі пусків 600–800 при роботі у базовому режимі.

Поточне напрацювання основного генеруючого обладнання ТЕС перевищує паркове значення в 1,2–1,5 рази [2]. Також стан обладнання ТЕС ускладнюється тим фактом, що з-за недостачі пікових потужностей в балансовому співвідношенні енергетичного вироблення, велика кількість пилувугільних електростанцій переводиться в маневренні режими роботи [3].

Найбільш раціональним рішенням забезпечення енергетичного балансу наявних потужностей було б введення нових енергетичних маневрових енергоблоків. Але з урахуванням економічних можливостей енергетичної галузі України варто розглянути можливість повторного продовження експлуатації енергетичного обладнання пилувугільних електростанцій з понад парковим напрацюванням.

Оскільки високотемпературні ротори є одними з найдорожчих вузлів паротурбінної установки, питання про можливість продовження їх терміну експлуатації є стратегічно важливим завданням. Відомо, що при їх проектуванні вводилися значні коефіцієнти запасу міцності. Виходячи з цього, існує можливість, після проведення комплексного дослідження стану обладнання, продовження терміну експлуатації окремих вузлів паротурбінної установки.

## Мета роботи

Метою даної роботи є обґрунтування допустимості подальшої експлуатації ротора середнього тиску (РСТ-2) турбіни енергоблоку № 9 Луганської ТЕС з урахуванням критичного розміру тріщин, що виникли в експлуатаційний період.

Для досягнення поставленої мети необхідне проведення досліджень, спрямованих на аналіз можливості продовження експлуатації даного об-

ладнання після проведення проточки радіальних канавок різної глибини в місцях виникнення тріщин. Також необхідний прогноз можливості продовження розвитку тріщин в канавках.

## Результати діагностичного контролю РСТ блоку № 9 Луганської ТЕС

Візуальний контроль та магнітно-порошкова діагностика ротору середнього тиску турбіни К-200-130-3 блоку № 9 Луганської ТЕС за період довготривалої експлуатації (1982–2006 рр.) показали, що в деяких випадках після визначеного числа пусків і терміну експлуатації в теплових канавках передніх кінцевих ущільнень ротора високого (РВТ) та середнього тиску (РСТ) мають місце корозійні втомні пошкодження в вигляді тріщин різної глибини (порядку 1–2,5 мм). Також виявлені кільцеві тріщини в галтелях дисків 13-го ступеня з боку 14-го ступеня РСТ, глибина яких складала біля 4-х мм. При цьому напрацювання такого типу турбін знаходилося у межах 186–226 тис. год та більше, а кількість пусків з різних теплових станів дорівнювала 800–1680.

Згідно рекомендацій ЦКБ «Енергопрогрес» (м. Харків), зазначені дефекти усувалися при проведенні ремонтних заходів по тепловим канавкам шляхом їх проточки, зняття поверхневого шару металу та збільшення ширини канавок з 3,5 до 5,5 мм і радіуса закруглення на дні канавки з 1,5 до 2,5 мм. По галтелі диску 13-го ступеня РСТ було рекомендовано зробити кільцеву вибірку на глибину 4–4,3 мм до усунення тріщини (рис. 1).

Для першого розрахунку виділені два моменти часу, для яких визначали рівень напружень:  $\tau_1 = 2460$  с (вихід на режим холостого ходу  $n = 3000$  об/хв) та  $\tau_2 = 6780$  с (кінець етапу навантаження). Для другого розрахунку характерним є тільки один максимум радіальної різниці температур в РСТ при  $\tau = 2460$  с. Аналогічна картина має місце при пуску з холодного стану. Максимальний рівень напружень спостерігається в зоні проточки другої канавки переднього кінцевого ущільнення при пусках з холодного стану (ХС) і складає 257 МПа.

Для РСТ у порівнянні з РВТ, тріщини в теплових канавках мають більшу глибину, що обумовило відповідно більш глибоку їх розточку (до 2,6 мм) та більш високі напруження. Зниження температури пари перед поштовхом у циліндрі середнього тиску до температури металу підвищує амплітуду еквівалентних напружень в теплових канавках № 1–6 переднього кінцевого ущільнення в 1,5–1,9 рази у порівнянні з варіантом, коли температура  $t_{\text{пп}}$  перевищує температуру металу перед поштовхом на 60–70 °С.

При пусках з холодного стану еквівалентні напруження РСТ максимальні при початковому навантаженні  $N_0 = 5-7$  МВт. Проточка і змінення геометричної конфігурації теплових канавок зменшують коефіцієнт концентрації напружень на 7,8 %, а усунення дефекту в галтелі диску 13-го ступеня зменшують коефіцієнт концентрації напружень в галтелі в 1,2 рази [4].

При останньому дослідженні в 2017 році Лабораторією металів і зварювання відокремленого підприємства «Луганська ТЕС» ТОВ «ДТЕК СХІДЕНЕРГО» при візуальному контролі виявлено кільцеві тріщини по диску 13 ступені ротора середнього тиску (РСТ-2). Було проведено контрольні проточки в двох місцях до 8 мм і 10 мм від сумарної глибини 16 мм і 18 мм. Тріщина продов-

жує розвиватися. Лабораторією зроблено попередній висновок – РСТ-2 ремонту не підлягає і не придатний до подальшої експлуатації.

Для обґрунтування допустимості подальшої експлуатації ротора середнього тиску (РСТ-2) турбіни енергоблоку № 9 Луганської ТЕС з урахуванням критичного розміру тріщин, що виникли в експлуатаційний період, проводилися розрахункові експерименти з використанням 3D математичної моделі, описаної в [5], по визначенню теплового, напружено-деформованого стану та тривалої міцності досліджуваного об'єкта. 3D моделювання РСТ дозволило більш точно визначитися щодо прогнозованого розвитку тріщин в період експлуатації та можливості подальшої експлуатації ротора середнього тиску.

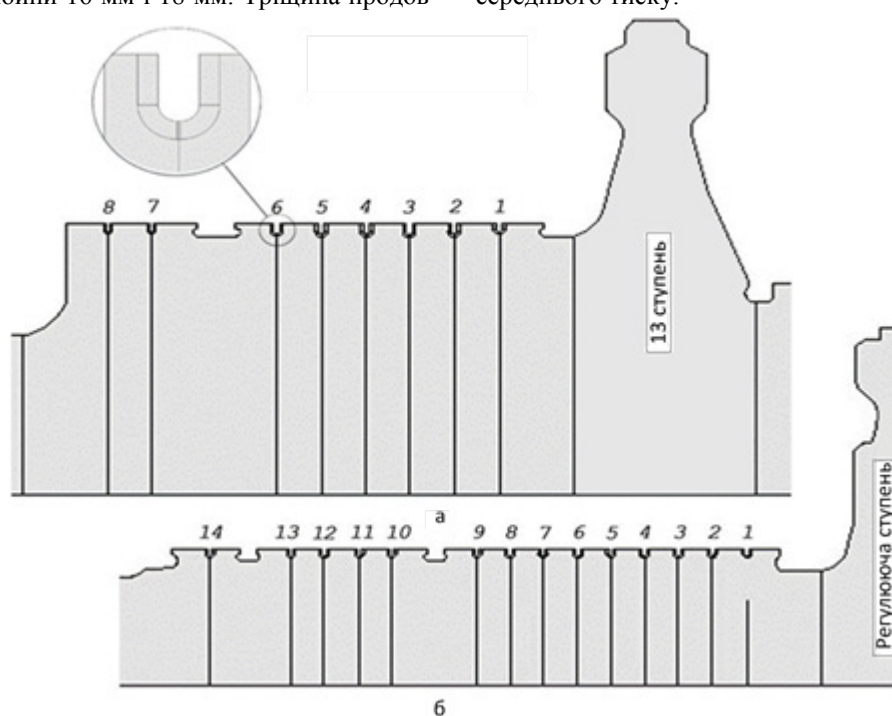


Рис. 1 – Фрагменти РВТ і РСТ турбіни К-200-130-3: а – РСТ; б – РВТ; 1–8 та 1–14 – теплові канавки ущільнень

У даній роботі обчислення інтенсивності напружень здійснюється методом скінчених елементів [6] для фіксованих розмірів канавок з наступною інтерполяцією для проміжних розмірів.

Розрахунок інтенсивності напружень в вершині канавки проводився для канавок глибиною 18 мм, 28 мм та 38 мм. Сітка кінцевих елементів згущувалася до вершини канавки за законом геометричної прогресії, коли кожен найближчий до вершини кінцевий елемент був менше попереднього в 1,5 рази. Розмір найменшого елемента у вершині канавки становив 0,1 мм. Також докладно враховано особливості конструкції ротора середнього тиску по обидва боки від 13-го ступеня РСТ. Загальна кількість кінцевих елементів при дискретизації перевищувала 1,5 млн. (рис. 2).

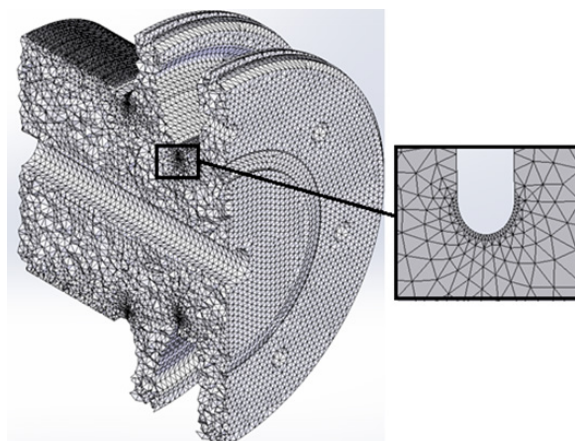


Рис. 2 – Кінцево-елементна сітка

### Розрахункова оцінка напружено-деформованого стану ротора ЦСТ

Розглянуто три пускових режими роботи парової турбіни: пуск з холодного стану (ХС), з неостиглого стану (НС) та з гарячого стану (ГС), а також стаціонарний режим роботи.

Проведення числового дослідження теплового та напружено-деформованого станів (НДС) ротора ЦСТ забезпечено даними теплофізичних та фізико-механічних властивостей його сталі в залежності від температури згідно рекомендацій [4].

Напружено-деформований стан оцінювався у пружно-пластичній постановці з використанням скінчено-елементного методу дискретизації розра-

хункової області. Для встановлення НДС враховувалися основні типи напружень, а саме температурні напруження, нерівномірність температурних полів, напруження від тиску та відцентрових сил.

На стаціонарному режимі роботи при глибині канавки 18 мм (рис. 3) інтенсивності умовних пружних напружень максимальні у розвантажувальних отворах дисків 13-го ступеня РСТ і складають 147 МПа. Також значний рівень інтенсивності умовних пружних напружень спостерігається у теплових канавках за 13-им ступенем РСТ (105 МПа) та в осьовому отворі РСТ (110 МПа).

Приклади отриманих результатів наведено на рис. 4 та у таблиці 1.

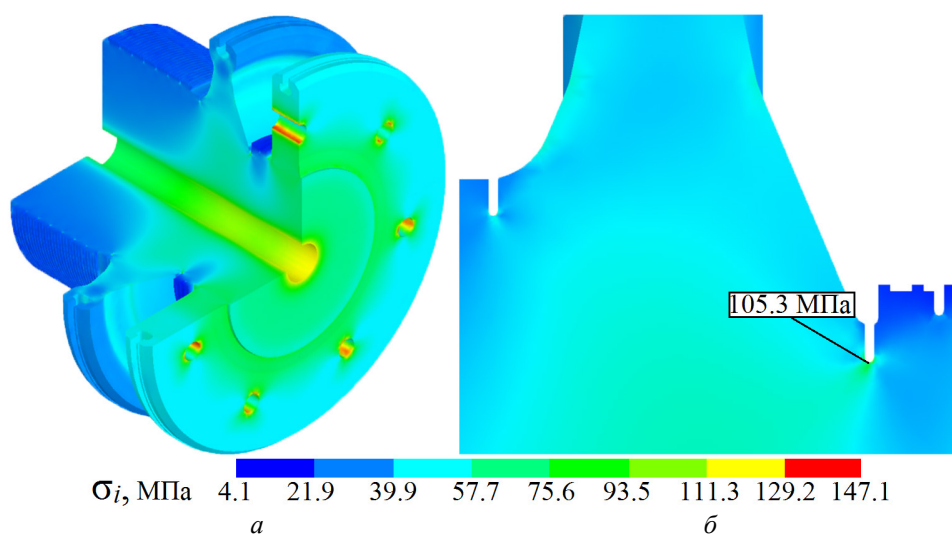


Рис. 3 – НДС РСТ на стаціонарному режимі роботи при глибині канавки 18 мм: а – 3D фрагмент 13-го та 14-го ступенів з передніми кінцевими ущільненнями; б – 2D фрагмент 13-го ступеня в зоні придискових канавок

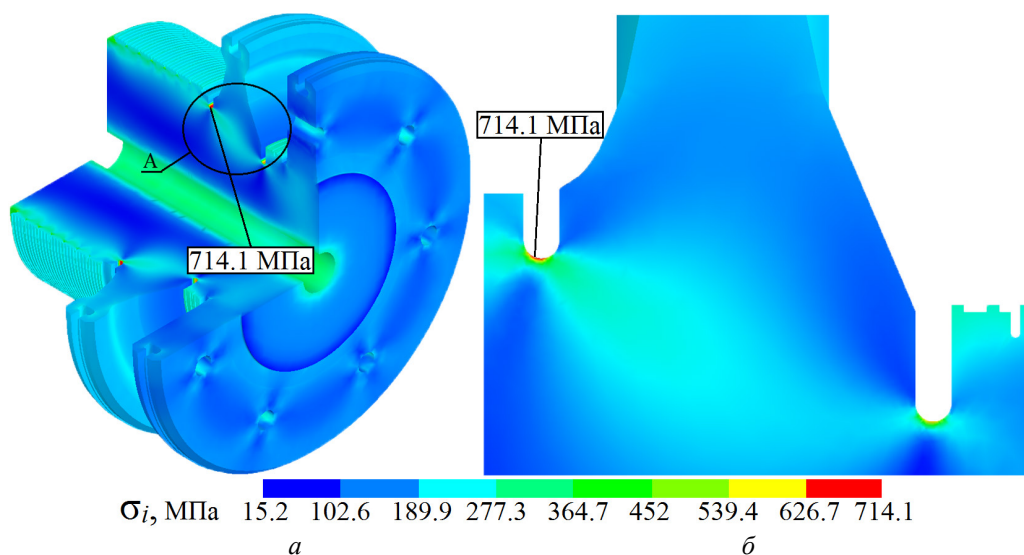


Рис. 4 – НДС РСТ при пуску з ХС при глибині канавки 28 мм в момент часу 4500 с: а – 3D фрагмент 13-го та 14-го ступенів з передніми кінцевими ущільненнями; б – 2D фрагмент 13-го ступеня в зоні придискових канавок

Таблиця 1 – Середні значення інтенсивності умовних пружних напружень в вершині канавки РСТ, МПа

Режим роботи	Глибина проточки канавок		
	18 мм	28 мм	38 мм
Стационарний	1.053e + 008	1.325e + 008	1.475e + 008
ХС	1.078e + 009	1.216e + 009	1.527e + 009
НС	6.515e + 008	7.241e + 008	9.216e + 008
ГС	8.064e + 008	8.966e + 008	1.228e + 009

Для нестационарних режимів роботи парової турбіни напружено-деформований стан рахувався для моментів часу, при яких спостерігається максимальний градієнт температури згідно методики, описаної в [8]. Так для режиму пуску з холодного стану було обрано момент час 4500 с, для пуску з нестиглого стану 3000 с, для пуску з гарячого стану 1900 с.

Різко збільшуються інтенсивності умовних пружних напружень при роботі на змінних режимах, так при глибині канавки 18 мм (табл. 1) інтенсивності умовних пружних напружень складають від 651 МПа (режим НС) до 1078 МПа (режим ХС). Поглиблення канавок до 38 мм, що пов'язано з розвитком тріщин в канавках згідно візуального контролю «Лабораторії металів і зварювання», викликає підвищення інтенсивності умовних пружних напружень при пусках з холодного (1527 МПа), нестиглого (921 МПа) та гарячого станів (1228 МПа), тобто збільшуються в середньому на 42 %. Отримані результати чітко показують неможливість подальшої експлуатації РСТ.

Аналіз отриманих результатів показує, що на стаціонарному режимі роботи значення напружень у вершині канавки не перевищують 147 МПа при межі міцності 551 МПа і тріщина не буде продовжувати розвиватись. Результати для нестационарних пускових режимів, де напруження в канавках значно перевищують межу текучості, свідчать про неможливість подальшої експлуатації ротора.

Як варіант вирішення проблеми, було запропоновано в місцях виникнення тріщин виконати вибірку металу до розміру канавок, при якій відношення глибини до ширини не перевищує 2 (розміри канавки 28×15 мм). Розраховано НДС РСТ при пуску з ХС («найважчий» режим роботи). Результати розрахунків приведено на рис. 4.

Як видно з наведеного рисунку, максимальні величини напружень змістились у бік ущільнень, а їх значення зменшились незначно до 714 МПа. Отже, в розглянутому випадку, проточка канавок не дає суттєвого поліпшення стану досліджуваного ротора і подальша експлуатація РСТ блоку № 9 Луганської ТЕС не рекомендується.

### Висновки

Дослідження теплового, напружено-деформованого стану РСТ турбін К-200-130, що експлуатуються на ТЕС України в напівпікових

режимах, дозволяють зробити висновок про можливість підвищення залишкового ресурсу після виконання конструктивно-ремонтних заходів, а саме вирізання металу поверхневого шару теплових канавок на допустиму величину.

Для енергоблоку № 9 Луганської ТЕС, вирізання металу поверхневого шару теплових канавок РСТ на 18 мм турбін К-200-130 не дає можливість підвищення залишкового ресурсу та продовження експлуатації. Збільшення глибини канавок до 28–38 мм призводить до значного підвищення інтенсивності умовних пружних напружень при пусках з холодного (1216–1527 МПа), нестиглого (714–921 МПа) та гарячого станів (897–1228 МПа) та неможливості подальшої експлуатації РСТ.

Значна вибірка металу до розміру канавок при якій відношення глибини до ширини не перевищує 2 не дає суттєвого поліпшення стану досліджуваного ротора і подальша експлуатація РСТ не рекомендується.

За результатами проведеного розрахункового дослідження ротор середнього тиску (РСТ-2) турбіни К-200-130 енергоблоку № 9 Луганської ТЕС з урахуванням критичного розміру тріщин, що виникли в експлуатаційний період, знято з експлуатації.

### Список літератури

1. НД МПЕ України. Контроль металу і продовження терміну експлуатації основних елементів котлів, турбін і трубопроводів теплових електростанцій: СОУ-Н МПЕ 40.17.401:2004. Офіц. вид. Київ: ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, 2005. 76 с.
2. ООО «ДТЭК» (Донбасская топливно-энергетическая компания). ДТЭК. Интегрированный отчет 2017. Финансовые и нефинансовые результаты. Киев, 2018. 146 с.
3. Черноусенко О. Ю., Пешко В. А. Вплив роботи енергоблоків ТЕС в маневреному режимі на вичерпання ресурсу енергетичного обладнання. Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Харків: НТУ «ХП», 2016. № 10(1182). С. 6–16. Бібліогр.: 7 назв. ISSN 2078-774X. doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.01.
4. Черноусенко О. Ю., Антонович А. В., Кришук Н. Г., Космина М. В., Долгих М. О. Усталостные повреждения роторов ЦВД и ЦСД паровых турбин К-200-130-3 на ТЭС Украины. Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Харків: НТУ «ХП», 2007. № 2. С. 77–83. Бібліогр.: 5 назв. ISSN 2078-774X.
5. РТМ 24.020.16-73. Турбины паровые стационарные. Расчет температурных полей роторов и цилиндров паровых турбин методом электро моделирования. Москва: Минтяжмаш, 1973. 104 с.
6. Типовая инструкция по пуску из различных тепловых состояний и останову моноблока мощностью 200 МВт с

- котлом ТП-100 (для работы в режиме регулирования нагрузки энергосистем). Москва: СПО ОРГРЭС, 1977. 46 с.
- Черноусенко О. Ю., Антонович А. В., Кришук Н. Г., Долгих М.О. Усталостные повреждения роторов ЦВД и ЦСД паровых турбин К-200-130-3 на ТЭС Украины и влияние на них реконструктивно-ремонтных и эксплуатационно-технологических факторов. *Энергетика и электрификация*. 2007. № 3. С. 34–40.
  - Peshko V., Chernousenko O., Nikulenkova T., Nikulenkov A. Comprehensive rotor service life study for high & intermediate pressure cylinders of high power steam turbines. *Propulsion and Power Research*. China: National Laboratory for Aeronautics and Astronautics. 2016. Vol. 5. Iss. 4. pp. 302–309.
  - Chernousenko, O., Rindyuk D., Peshko V. Service life-time study for automatic stop-valve of K-200-130 turbine. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 5. No 8(89). pp. 39–44. ISSN 1729-3774 (print), ISSN 1729-4061(on-line).
- References (transliterated)**
- Ministry of fuel and energy of Ukraine (2005), *ND MPE Ukraini'ny. Kontrol' metalu i prodovzhennja terminu ekspluatacij osnovnyh elementiv kotliv, turbin i truboprovodiv teplovyh elektrostantsij: SOU-N MPE 40.17.401:2004* [RD of MFEU. Metal inspection and extending operating life of main components of boilers, turbines and pipelines of thermal power plants: SOU-N MPE 40.17.401:2004], Kiev, 76 p.
  - ООО «ДТЖЕК» (Donbasskaja toplivno-jenergeticheskaja kompanija) [DTEK LLC (Donbass Fuel-Energy Company)] (2018), *ДТЖЕК. Інтегрований звіт 2017. Фінансові і нефінансові результати [DTEK. Integrated report 2017. Financial and non-financial results]*, Kiev, 146 p.
  - Chernousenko O., Peshko V. (), “Vplyv roboty energobloktiv TES v manevrenomu rezhymy na vycherpannja resursu energetychnogo obladnannja [Influence of the Operation of the Power Units of Thermal Power Plants in the Maneuvering Mode on the Aging Rate of Power Equipment]”, *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 10(1182), pp. 6–16, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.01.
  - Chernousenko O. Yu., Antonovich A. V., Krischuk N. G., Kosmina M. N., Dolgih M. A. (2007), “Ustalostnye povrezhdenija rotorov CVD i CSD parovyh turbin K-200-130-3 na TES Ukrainy i vlijanie na nih rekonstruktivno-remontnyh i jekspluatacionno-tehnologicheskikh faktorov [Fatigue damage to the rotors of high-pressure cylinders and central modulators of steam turbines K-200-130-3 on the TEN of Ukraine and the effect on them of reconstructive repair and operational-technological factors]”, *Jenergetika i jelektrifikacija* [Energy and electrification], no 3, pp. 34–40.
  - Peshko V., Chernousenko O., Nikulenkova T., Nikulenkov A. (2016), “Comprehensive rotor service life study for high & intermediate pressure cylinders of high power steam turbines”, *Propulsion and Power Research*, vol. 5, iss. 4, pp. 302–309, National Laboratory for Aeronautics and Astronautics, China.
  - Chernousenko, O., Rindyuk D., Peshko V. (2017), “Service life-time study for automatic stop-valve of K-200-130 turbine”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 5, no 8(89), pp. 39–44, ISSN 1729-3774 (print), ISSN 1729-4061(on-line)

Надійшла (received) 04.02.2019

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

**Черноусенко Ольга Юрійвна (Черноусенко Ольга Юрьевна, Chernousenko Olga Yuriiivna)** – доктор технічних наук, професор, КПІ ім. Ігоря Сікорського, завідувач кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій; м. Київ; тел.: (067) 504–82–92; e-mail: chernousenko20a@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1427-8068>. Scopus 6507954096.

**Риндюк Дмитро Вікторович (Рындюк Дмитрий Викторович, Rindyuk Dmitro Viktorovich)** – кандидат технічних наук, доцент, КПІ ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій; м. Київ; тел.: (099) 055–47–04; e-mail: rel\_dv@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7770-7547>. Scopus 57193402888.

**Пешко Віталій Анатолійович (Пешко Виталий Анатольевич, Peshko Vitaliy Anatoliyovych)** – кандидат технічних наук, КПІ ім. Ігоря Сікорського, старший викладач кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій; м. Київ; тел.: (067) 176–54–71; e-mail: vapeshko@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0610-1403>. Scopus 57194077095.