

О. Ю. ЧЕРНОУСЕНКО, Л. С. БУТОВСЬКИЙ, Д. В. РИНДЮК

РОЗРАХУНКОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООВОГО, НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТА ІНДИВІДУАЛЬНОГО РЕСУРСУ ТРУБОПРОВОДУ КОТЛОАГРЕГАТУ

АНОТАЦІЯ На основі проведення чисельних досліджень теплового, напружено-деформованого стану та залишкового ресурсу трубопроводів котлоагрегатів розроблена та обґрунтована методика розрахункової оцінки впливу локальної нерівномірності теплових потоків на пошкоджуваність та залишковий ресурс елементів з метою подовження терміну експлуатації енергетичного устаткування. Результати виконаних досліджень можуть бути використані у великій і малій енергетиці, промисловості і газотранспортній системі України і інших галузях науки і техніки в умовах роботи елементів обладнання при високих температурах і локальних температурних градієнтах у разі використання паливників стабілізаторного типу з регулюванням профілю температурного поля газів.

Ключові слова: котельний агрегат, паливник, енергоблок, тепла електрична станція, парова турбіна, індивідуальний ресурс, малоциклова утомленість, пошкоджуваність, залишковий ресурс, прогнозування.

O. YU. CHERNOUSENKO, L. S. BUTOVSKIY, D. V. RINDYUK

COMPUTATIONAL INVESTIGATION OF THERMAL STRESS-STRAIN BEHAVIOR AND INDIVIDUAL SERVICE LIFE OF THE BOILER PIPELINE

АННОТАЦИЯ The issues of record-keeping of the damages caused by the impact of high local gas temperatures and local temperature inhomogeneity and the reliable estimate of the remaining life of high temperature elements are topical and their solution will provide a reliable and long-term operation for power generating equipment. Using the data of numerous investigations of thermal state, stress-strain state and the remaining life of boiler pipelines we developed and substantiated the methods of calculated estimate of the effects of the local inhomogeneity of thermal flows on the damageability and remaining life of the elements to extend the operation life of power equipment. Based on the operation data of industrial power equipment and the data of physical experiments appropriate initial and boundary conditions were selected that enabled an adequate simulation of the influence of the irregular temperature fields of combustion products. Using the Solid Works bundled software we carried out computational investigations that take into account the gas dynamics of the behavior of gas flow streamlining the pipeline. Thermal and stress-strain states were defined and service life of the boiler unit pipeline was determined depending on equipment operation conditions. The obtained research data can be used for high and low power engineering, industry and gas transportation system of Ukraine and other fields of science and engineering to operate equipment elements at high temperatures and high local temperature gradients when the burners of a stabilizing type equipped with the gas temperature field shape control system are used.

Key words: boiler unit, burner, power unit, heat power plant, steam turbine, individual resource, low-cycle fatigue, damageability, remaining life, and the prediction.

Вступ

Важливим фактором необхідності розробки паливникових пристроїв нового типу є те, що в енергетиці України експлуатується значна кількість енергетичних та промислових котлів різної потужності, печей, сушил, газотурбінних установок тощо, що відпрацювали термін експлуатації. Досвід роботи таких установок показав, що однією з проблем подальшого функціонування є наявність істотної невідповідності між реальним та розрахунковим розподіленням теплових потоків в топковому просторі. Це призводить до термічних перекосів в елементах обладнання, виникнення напружень і зрештою до їх аварії. За цих обставин є необхідність проведення робіт з визначення стану найбільш термонапружених елементів, оцінка залишкового ресурсу, видача рекомендацій щодо своєчасного зняття їх з експлуатації або розробка порівняно заощадливих заходів для подовження терміну експлуатації цих агрегатів.

Так, наприклад, для котлів ДКВР-20-13 причини аварійних зупинок розподіляються на-

ступним чином: перепалив труб фронтового екрану – 45 %, деформації і розриви бокових екранів – 37 %, перепалив пароперегрівників – 7 %, пошкодження обмурівки, облицювання, обшивки – 4 %. Тобто більше 80 % аварійних зупинок котлів пов'язані з перегрівом екранних труб. Найважливішою причиною таких перегрівів вважаються високі локальні теплові потоки від факелу [1].

Врахування пошкоджень від впливу високого рівня місцевих температур газів, локальної нерівномірності їх температури та достовірна оцінка залишкового ресурсу високотемпературних елементів є актуальними і дозволять забезпечити надійну та довготривалу експлуатацію енергогенеруючого устаткування.

Мета роботи

Оцінка залишкового ресурсу та подовження терміну експлуатації теплоенергетичного устаткування на основі розрахункового дослідження впливу рівня та локальної нерівномірності температур.

Геометрична модель трубопроводів котлоагрегатів та методика розрахункових досліджень

Розрахункові дослідження теплового, напружено-деформованого стану та залишкового ресурсу трубопроводу котлоагрегату містить побудову просторового 3D аналогу котлоагрегату (рис. 1). Побудовано комплексну модель, яка включає пальниковий пристрій, що створений трьома стабілізаторами шириною $B_{ст} = 15$ мм, що розмішувались в каналі шириною 150 мм з кроком $t_{ст} = 50$ мм, та циліндричну трубу діаметром 32×6 мм і довжиною 150 мм. Потік газів, які утворювались після пальникового пристрою, обтікає циліндричну трубу. Коефіцієнт затінення $\kappa_f = 0,30$. Відстань від пальникового пристрою до циліндричної труби дорівнювала 110 мм та 50 мм. Трубопровід діаметром обтікався потоком газів, які утворювались після пальникового пристрою. Приймалось, що температура газів на зрізі стабілізаторів дорівнювала $t_r = 1000\text{--}1300$ К. Температура повітря дорівнювала $T_n = 300$ К. Швидкість газів приймалась рівною $w_r = 10$ м/с. В якості середовища, що сприймає тепло в трубопроводі, задавалась живильна вода з температурою $t_b = 20$ °С і швидкістю $w_b = 0,5$ м/с. Напрями току води та гарячих газів були перпендикулярними. В якості граничних умов при теплових розрахунках задавались ГУ I–IV роду. Коефіцієнти тепловіддачі для газу були на рівні $80\text{--}100$ Вт/(м²·К), а для живильної води коефіцієнти тепловіддачі дорівнювали $300\text{--}500$ Вт/(м²·К).

На ділянці довжиною $X = 110$ мм між пальниковим пристроєм і трубопроводом відбувається масообмін між гарячими газами сліду за стабілізатором і холодним повітрям в щілині між стабілізаторами. В тильній частині стабілізатора внаслідок інтенсивного масообміну в зоні рециркуляції температура вирівнюється і знаходиться на рівні 400 °С. Але повного вирівнювання не відбувається.

Задана велика різниця температур між гарячими газами та холодною водою дозволила апробувати розрахункову модель гідродинаміки, теплового та напружено-деформованого стану трубопроводу.

Для вирішення краєвої задачі нестационарної теплопровідності необхідно задати граничні умови на всіх поверхнях теплообміну таким чином, щоб вони відповідали пусковим характеристикам та експлуатаційному режиму роботи котлоагрегату. При завданні граничних умов розглядалися водогрійні та енергетичні котли.

Краєва задача нестационарної теплопровідності циліндричної труби вирішується за допомогою рівняння виду

$$\operatorname{div}[\lambda(T)\operatorname{grad}T] = c(T)\gamma(T)\frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (1)$$

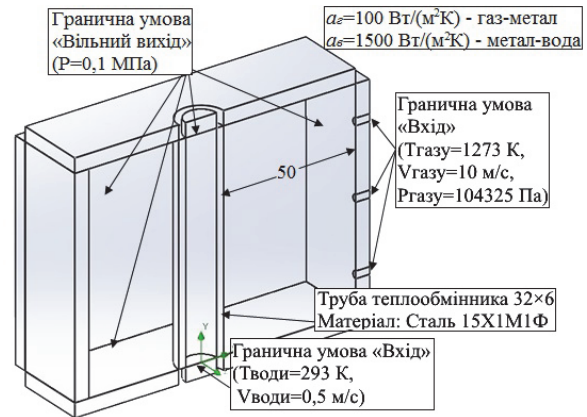


Рис. 1 – Геометрична модель та граничні умови циліндричного патрубку

де λ , c , γ – функції температури і координат при початкових умовах $T_0 = T(x, y, z, 0) = f_0(x, y, z)$ і граничних умовах I, II, III, або IV роду.

При вирішенні задачі теплопровідності треба задавати нестационарними граничні умови I–IV роду на різних поверхнях циліндричної труби:

I роду – коли відома температура поверхні циліндричної труби в певний момент часу

$$T_{ст} = f_1(x, y, z, \tau). \quad (2)$$

Наприклад, для експлуатаційного режиму в початковий момент часу задавались відповідні температури циліндричної труби.

II роду – на ізольованих поверхнях циліндричної труби граничні умови задавались тепловим потоком

$$q_{ст} = -\lambda \left(\frac{dT}{dn} \right) = f_2(x, y, z, \tau). \quad (3)$$

III роду – задавали закономірності теплообміну між гарячою паливною сумішшю і металом циліндричної труби, температурою води та коефіцієнтом тепловіддачі

$$-\lambda \left(\frac{dT}{dn} \right) = \alpha (T_{сп} - T_{ст}). \quad (4)$$

IV роду – відповідали ідеальному контакту твердих тіл, коли обидва тіла на межі їх дотику мають однакові температури і теплові потоки, наприклад, для контакту циліндричної труби та трубоної дошки

$$\left. \begin{aligned} T_{ст1} &= T_{ст2}, \\ -\lambda_1 \left(\frac{dT}{dn} \right)_1 &= -\lambda_2 \left(\frac{dT}{dn} \right)_2 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Коефіцієнти тепловіддачі α для різних зон циліндричної труби визначались згідно критеріальних рівнянь при конвективному теплообміні (ГУ задаються на поверхні циліндричної труби) та при розрахункових дослідженнях газодинаміки течії робочих тіл (гаряча паливна суміш та вода) в програмному комплексі *SolidWorks Simulation*.

Розрахункові дослідження теплового стану трубопроводу котлоагрегату

Під час парових випробувань [2] було встановлено, що при вимірах температури газів на одному й тому ж режимі роботи топки через невеликі проміжки часу (5–10 хв.) виявлені значні різниці температур в одних і тих же точках перерізу топки. Проведені дослідження по виміру температури газів в топках потужних парових пилувугільних котлів П-49 та П-57 показали, що нерівномірності температурних полів у великих топкових камерах можуть досягати величини (400–500) °С. Різниця значень середніх інтегральних температур вздовж перерізу при незмінному топковому режимі може сягати (300–350) °С.

Розрахункове дослідження газодинаміки гарячого повітря в котлоагрегаті, теплового (ТС) та

напружено-деформованого (НДС) стану циліндричної труби проводилося також із застосуванням програмного комплексу *Solid Works Simulation*. Коефіцієнти тепловіддачі α для різних зон циліндричної труби визначалися згідно критеріальних рівнянь. Відстань від пального пристрою до циліндричної труби дорівнювала 50 мм та 110 мм (рис. 1). За циліндричною трубою була значна відстань до стінки котлоагрегату.

Розподілення швидкостей гарячого повітря в газовому просторі котлоагрегату (рис. 2) свідчить про зменшення швидкості з 10 м/с в зоні виходу газу зі стабілізаторів пального пристрою до 1 м/с в зоні за трубою та між стабілізаторами. Також має місце зниження швидкості до 4,6–5,5 м/с в зоні натікання гарячого газу на циліндричну трубу.

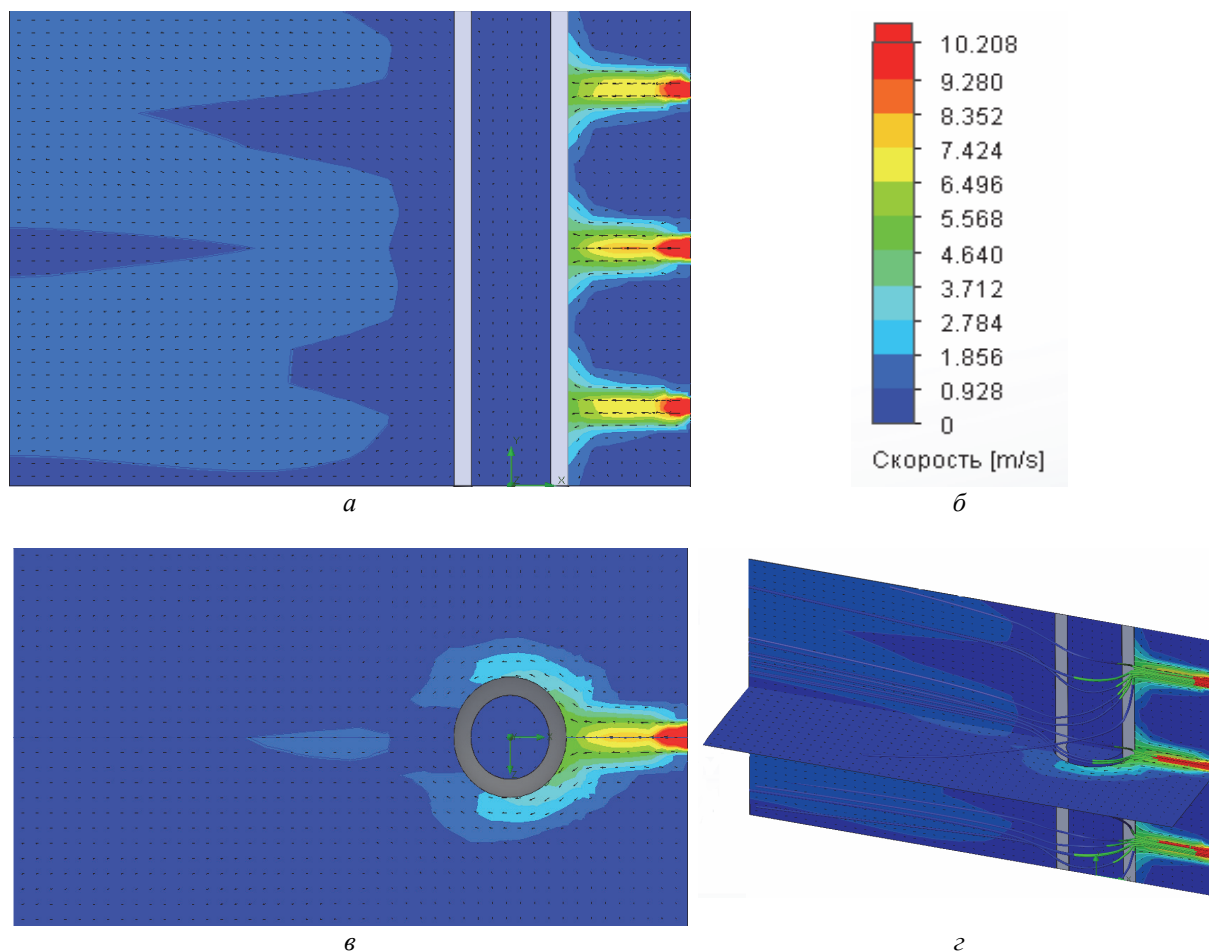


Рис. 2 – Вектори швидкості та лінії току при обтіканні циліндричної труби продуктами згоряння, відстань від пального пристрою 50 мм (*Solid Works*): а – площина зони пального пристрою; б – значення швидкості газової суміші; в – вид зверху на циліндричну трубу; г – 2D площина зони пального пристрою

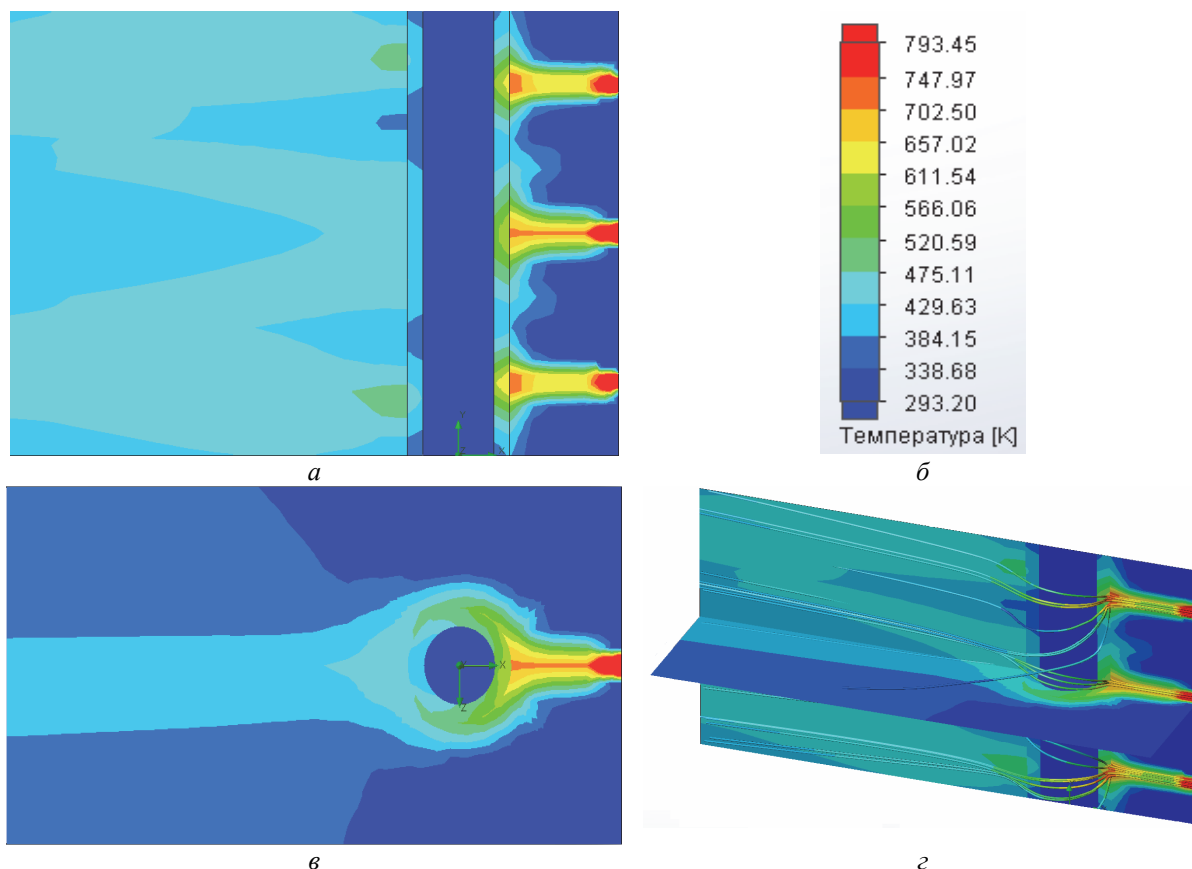


Рис. 3 – Розподілення температур при обтіканні циліндричної труби продуктами згоряння (Solid Works), відстань від пальника 50 мм: а – площина зони пальникового пристрою; б – значення температури; в – вид зверху на циліндричну трубу; з – 2D площина зони пальникового пристрою

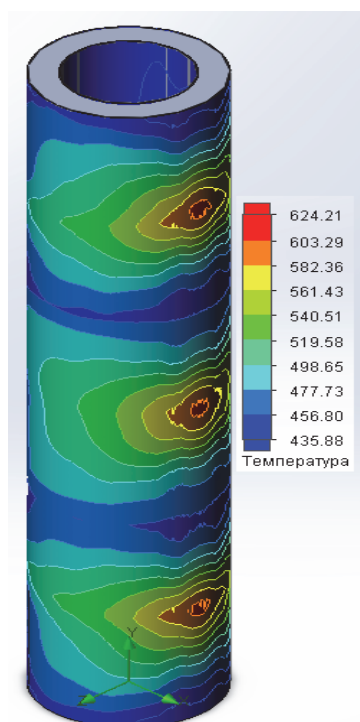


Рис. 4 – Розподілення температур при обтіканні циліндричної труби продуктами згоряння, відстань від пальника 110 мм

Розподілення температури по товщині стінки циліндричної труби (рис. 4) вказує на значну нерівномірність теплового стану (160–392 °С), що пов’язано зі значною нерівномірністю температури гарячого повітря у просторі котлоагрегату, температура гарячого повітря знаходиться на рівні 110–520 °С. Максимальна температура виникає на вістовому напрямку по ходу гарячого газу і становить 520 °С. Також значний рівень температур гарячого повітря фіксується перед циліндричною трубою по ходу гарячого газу напроти центрального стабілізатору пальникового пристрою (293–427 °С).

Наступна досліджена конфігурація моделі передбачала розміщення циліндричної труби теплообмінника на відстані 110 мм від пальникового пристрою (рис. 4), при цьому відстань до стінки котлоагрегату перевищувала 110 мм. Отриманий осьовий та радіальний розподіл температур супроводжується значною нерівномірністю теплового стану. Температурний рівень основного металу трубок теплообмінника змінюється від 181 °С до 349 °С.

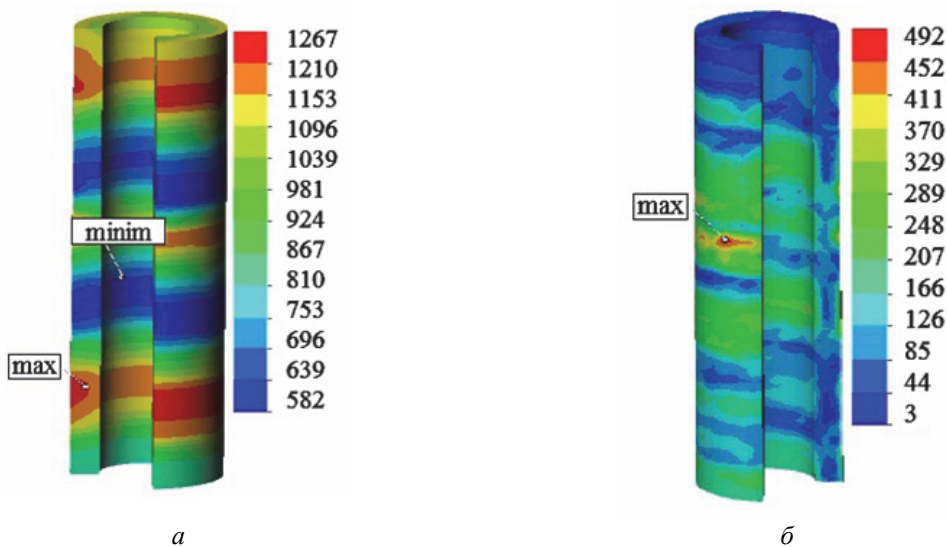


Рис. 5 – ТС та НДС циліндричного патрубку котлоагрегату (Solid Works), відстань від пальника 50 мм:
 а – тепловий стан, К; б – напружено-деформований стан, МПа

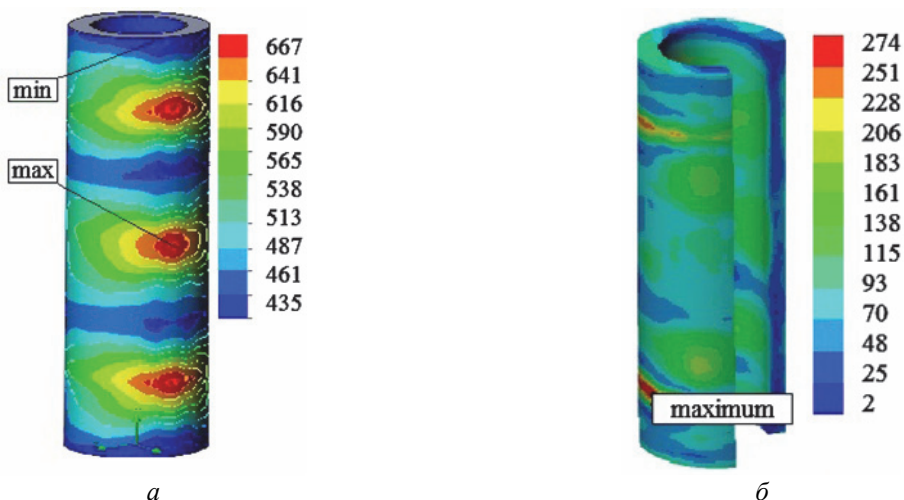


Рис. 6 – ТС та НДС циліндричного патрубку котлоагрегату (Solid Works), відстань від пальника 50 мм:
 а – тепловий стан, К; б – напружено-деформований стан, МПа

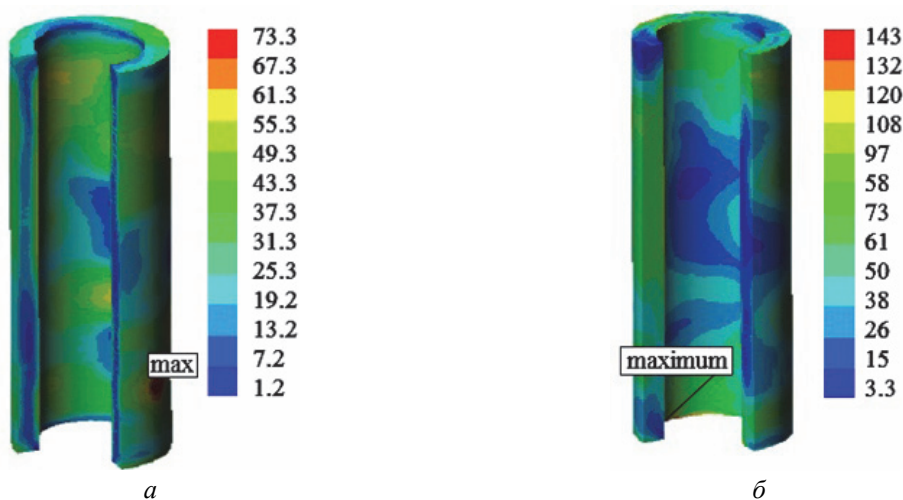


Рис. 7 – НДС циліндричного патрубку котлоагрегату (Solid Works), відстань від пальника 110 мм:
 а – вільне розширення циліндричного патрубку по кінцях, МПа; б – закріплення циліндричного патрубку по кінцях, МПа

Розрахункові дослідження НДС трубопроводу котлоагрегату

При розрахунках НДС, було знайдено головні напруження та інтенсивності напружень на протязі всього періоду, що відповідає пусковим вимогам.

Напружено-деформований стан енергетичного обладнання розраховувався при сумісному вирішенні рівнянь рівноваги, які в тензорній формі мають вид

$$\{\sigma_{ij}\}_j + \rho X_i = 0; i, j = 1, 2, 3; p_i = f(x, y, z, 0), \quad (6)$$

де σ_{ij} – нормальні і дотичні напруження в елементах циліндричної труби; X_i – масова сила, яка діє в елементах циліндричної труби; p_i – зовнішні розподілені напруження; ρ – густина матеріалу елемента.

Також додавались рівняння, що характеризують одночасну дію деформацій та закону пружності, які в матричній формі мають вид

$$\{\varepsilon_{ij}\} = [a]\{\sigma_{ij}\} + \{\beta \times \Delta T\}, \quad (7)$$

де $\{\varepsilon_{ij}\}$ – вектор деформацій; $[a]$ – матриця пружних коефіцієнтів; $\{\sigma_{ij}\}$ – вектор напружень; $\{\beta \times \Delta T\}$ – вектор температурних деформацій; β – коефіцієнт лінійного розширення; ΔT – зміна температури циліндричної труби при експлуатації.

Розподілення температури по товщині стінки (рис. 5) свідчить про значний градієнт температур по всій площині трубопроводу. Температура металу трубопроводу знаходиться на рівні (250–300) °С. Максимальна температура гарячої газової суміші напроти центрального стабілізатору пального пристрою складає близько 1000 °С. Зони максимальних значень температур вздовж циліндричної труби розташовані напроти стабілізаторів пального пристрою відповідно. Температурна нерівномірність вздовж труби сягає 54 % (рис. 5) та кореспондується з даними експериментальних досліджень.

Розподілення інтенсивності напружень по товщині стінки циліндричного патрубку свідчить про те, що інтенсивність умовних пружних напружень в циліндричній трубі лежить в діапазоні 370–492 МПа (рис. 5) за умови завдання граничних умов конвективного теплообміну, та в діапазоні 138–274 МПа (рис. 6) за умови розрахунку газодинамічних характеристик гарячого потоку газу, що обтікає циліндричний патрубок.

Коли відстань від пального пристрою до циліндричної труби дорівнювала 110 мм, розподілення інтенсивності умовних пружних напружень в циліндричній трубі дорівнює 49–73 МПа (рис. 7а) за умови закріплення циліндричного патрубку по кінцях та 97–144 МПа (рис. 7б) за умови вільного розширення циліндричного патрубку по кінцях.

Розрахункові дослідження пошкоджуваності та залишкового ресурсу трубопроводу котлоагрегату

На базі нестационарного напружено-деформованого стану проводиться оцінка малоциклової втомлюваності та статичної пошкоджуваності циліндричного патрубку згідно робіт [2, 3], отримані температури металу циліндричного патрубку необхідні для подальшого розрахунку кількості циклів до руйнування. Контрольна розрахункова температура металу в окремих точках обирається по максимальному напруженню в зафіксований проміжок часу. Використання згідно [4] номінальної температури металу, викликає необгрунтоване зменшення ресурсних показників елементів парової турбіни і має сенс лише на етапі проектування нового обладнання.

На підставі аналізу діючих напружень і температурних полів обираються найбільш напружені області циліндричного патрубку, для яких проводиться оцінка малоциклової втомлюваності та статичної пошкоджуваності.

Залишкове напрацювання до появи тріщини (в роках) визначається за формулою [5]

$$[G]_{\text{зал}} = \frac{1 - \Pi'}{\Pi''_{\text{річ}}}, \quad (8)$$

де Π' – сумарне пошкодження, накопичене в металі циліндричного патрубку, що працює в умовах спільної дії повзучості при різних установлених режимах q' типів і циклічних навантажень при різних перемінних режимах k' типів; $\Pi''_{\text{річ}}$ – прогнозує, на наступний за аналізом період експлуатації, середнє річне пошкодження, що буде накопичуватися в розглянутій зоні циліндричного патрубку при чергуванні q'' типів сталих режимів і k'' типів циклів з різними циклічними. Двома штрихами відзначені всі величини, що відносяться до періоду експлуатації після проведення оцінки й продовження ресурсу.

Розрахункова оцінка статичного пошкодження циліндричного патрубку котлоагрегату визначається по максимальному напруженню металу (144 МПа) та знаходиться на рівні 0,57, коли час до настання граничного стану під дією еквівалентних напружень визначається за допомогою діаграми довготривалої міцності матеріалу [6-8].

Парковий ресурс паропроводів котлоагрегатів згідно [5] знаходиться на рівні 100–250 тис. год. Прогнозоване, на наступний за аналізом період експлуатації, середнє річне пошкодження, що буде накопичуватися в розглянутій зоні циліндричного патрубку, складе 0,019. Залишковий наробіток до появи тріщини (в роках) циліндричного патрубку котлоагрегату становить 12,9 років та відповідно 77400 годин при річному використанні котлоагрегату 6000 годин.

Висновки

- Створено методику визначення впливу різниці температур та їх градієнтів на оцінку залишкового ресурсу високотемпературних елементів енергетичного та промислового обладнання.

- Базуючись на даних про роботу промислового енергетичного обладнання та результатах фізичних експериментів, обрано коректні початкові та граничні умови, що дало змогу адекватного моделювання впливу нерівномірності поля температур продуктів згоряння.

- На базі програмного комплексу Solid Works виконано розрахункові дослідження, що враховують газодинаміку течії газового потоку при обтіканні трубопроводу.

- Визначено тепловий, напружено-деформований стан та проведено оцінку терміну експлуатації трубопроводу котлоагрегату в залежності від умов роботи обладнання.

- Основуючись на розробленій методиці проведено оцінку залишкового ресурсу трубопроводу, яка для наведених умов складає 77,4 тис. год. при статичній пошкоджуваності від довготривалих навантажень 57 %.

Список літератури

- 1 НД МПЕ України. Контроль металу і продовження терміну експлуатації основних елементів котлів, турбін і трубопроводів теплових електростанцій. – Типова інструкція. СОУ-Н МПЕ 40.17.401:2004. – Офіц. вид. – Київ : ГРІФРЕ : М-во палива та енергетики України, 2005. – 76 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України, Типова інструкція).
- 2 Температурные поля в топочных камерах мощных паровых котлов / В. Н. Головин, Л. М. Сорокопуд, О. А. Резник и др. // Теплоэнергетика. – 1988. – № 1. – С. 48–50.
- 3 ОСТ 108.031.02-75. Котлы стационарные паровые и водогрейные и трубопроводы пара и горячей воды. Нормы расчета на прочность. – Ленинград : НПО ЦКТИ, 1975. – 240 с.
- 4 РТМ 108.021.103. Детали паровых стационарных турбин. Расчёт на малоцикловую усталость. – М., 1985. – № АЗ–002/7382. – 49 с.
- 5 РД 34.17.440-96. Методические указания о порядке проведения работ при оценке индивидуального ресурса паровых турбин и продлении срока их эксплуатации сверх паркового ресурса. – Москва, 1996. – 98 с.

- 6 Ланин, А. А. Прочность и долговечность конструкций при ползучести / А. А. Ланин, В. С. Балина. – Санкт-Петербург : Политехника, 1996. – 257 с.
- 7 Биргер, И. А. Сопротивление материалов : учеб. пособие / И. А. Биргер, Р. Р. Мавлютов. – 2-е изд. – Москва : Ленанд, 2015. – 560 с. – ISBN 978-5-9710-1808-7.
- 8 Костюк, А. Г. Динамика и прочность турбомашин : учеб. для вузов по спец. "Турбиностроение" / А. Г. Костюк. – Москва : Машиностроение, 1982. – 264 с.

Bibliography (transliterated)

- 1 (2005), ND MPE Ukrayiny. Kontrol metalu i prodovzhennya terminu ekspluatatsiyi osnovnyx elementiv kotliv, turbin i truboprovodiv teplovyx elektrostancij. – Ty`pova instrukciya. 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], GRIFRE, Ministry of fuel and energy of Ukraine, Kiev, Ukraine.
- 2 Golovin, V. N. and Sorokopud, L. M. (1988), "Temperaturnye polya v topochnykh kamerah moschnykh parovykh kotlov [The temperature field in the combustion chamber of powerful steam boilers]", *Teploenergetika*, No. 1, pp. 48–50.
- 3 (1975), *Kotlyi stacionarnyye parovyye i vodogreynyye i truboprovody para i goryachey vodyi. Normy rascheta na prochnost [Boilers stationary steam and hot water. The rules for calculating for strength]*, Lviv, Ukraine.
- 4 (1985), RTM 108.021.103. *Detali parovykh stacionarnykh turbin. Raschet na malociklovuyu ustalost' [Details of stationary steam turbines. Low cycle fatigue calculation]*, Moscow, Russian.
- 5 (1996), RD 34.17.440–96. *Metodicheskie ukazaniya o porjadke provedeniya rabot pri ocenke individual'nogo resursa parovykh turbin i prodlenii sroka ih jekspluatatsii sverh parkovogo resursa [Methodological guidelines to perform works within assessment of individual service life of steam turbines and its extension beyond the fleet service life]*, Moscow, Russian.
- 6 Lanin, A. and Balina, V. (1996), *Prochnost i dolgovechnost konstruksiy pri polzuchesti [The strength and durability of designs at creep]*, S-Peterburg, Politehnika, Russian.
- 7 Birger, I. A. and Mavlyutov, R. R. (2015), *Soprotivlenie materialov*, ISBN 978 5-9710-1808-7, Lenand, Moscow, Russia.
- 8 Kostyuk, A. G. (1982), *Dinamika i prochnost turbomashin, Mashinostroenie*, Moscow, Russia.

Відомості про авторів (About authors)

Черноусенко Ольга Юріївна – доктор технічних наук, професор, кафедра теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; м. Київ; тел. м.: (067) 504–82–92; e-mail: chernousenko20a@gmail.com; cher_olya@2c.kiev.ua; ORCID 0000-0002-1427-8068.

Chernousenko Olga Yuriivna – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Head of the Department of Cogeneration Installations of Thermal and Nuclear Power Plants; Kyiv, Ukraine.

Бутовський Леонід Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, кафедра теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інсти-

тут імені Ігоря Сікорського»; м. Київ; тел. м.: (096) 633-07-21; e-mail: home_129@mail.ru; ORCID 0000-0001-8947-9887.

Butovsky Leonid Sergiyovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Department of Cogeneration Installations of Thermal and Nuclear Power Plants; Kyiv, Ukraine.

Риндюк Дмитро Вікторович – кандидат технічних наук, доцент, кафедра теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; м. Київ; тел. м.: (099) 055-47-04; e-mail: re_l_dv@ukr.net; ORCID 0000-0001-7770-7547.

Rindyuk Dmitro Viktorovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Department of Cogeneration Installations of Thermal and Nuclear Power Plants; Kyiv, Ukraine.

Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Черноусенко, О. Ю. Розрахункове дослідження теплового, напружено-деформованого стану та індивідуального ресурсу трубопроводу котлоагрегату / **О. Ю. Черноусенко, Л. С. Бутовський, Д. В. Риндюк** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 8(1230). – С. 49–56. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.08.07.

Please cite this article as:

Chernousenko, O., Butovsky, L. and Rindyuk, D. (2017), "Computational Investigation of Thermal Stress-Strain Behavior and Individual Service Life of the Boiler Pipeline", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 8(1230), pp. 49–56, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.08.07.

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Черноусенко, О. Ю. Расчетное исследование теплового, напряженно-деформированного состояния и индивидуального ресурса трубопровода котлоагрегата / **О. Ю. Черноусенко, Л. В. Бутовский, Д. В. Риндюк** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 8(1230). – С. 49–56. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.08.07.

АННОТАЦИЯ Вопрос учета поврежденных от воздействия высокого уровня местных температур газов, локальной неравномерности температуры и достоверная оценка остаточного ресурса высокотемпературных элементов актуальны и позволят обеспечить надежную и долговременную эксплуатацию энергогенерирующего оборудования. На базе проведения многочисленных исследований теплового, напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса трубопроводов котлоагрегатов разработана и обоснована методика расчетной оценки воздействия локальной неравномерности тепловых потоков на повреждаемость и остаточный ресурс элементов с целью продления срока эксплуатации энергетического оборудования. Основываясь на данных о работе промышленного энергетического оборудования и результатах физических экспериментов, избраны корректные начальные и граничные условия, что дало возможность адекватного моделирования влияния неравномерности поля температур продуктов сгорания. На базе программного комплекса *Solid Works* выполнены расчетные исследования, учитывающие газодинамику течения газового потока при обтекании трубопровода. Определены тепловое, напряженно-деформированное состояние и проведена оценка срока эксплуатации трубопровода котлоагрегата в зависимости от условий работы оборудования. Результаты выполненных исследований могут быть использованы в большой и малой энергетике, промышленности и газотранспортной системе Украины и других областях науки и техники в условиях работы элементов оборудования при высоких температурах и локальных температурных градиентах в случае использования горелок стабилизаторного типа с регулировкой профиля температурного поля газов.

Ключевые слова: котельный агрегат, горелка, энергоблок, тепловая электрическая станция, паровая турбина, индивидуальный ресурс, малоцикловая усталость, повреждаемость, остаточный ресурс, прогнозирование.

Надійшла (received) 07.02.2017