

Ясній О. Моделювання НДС колектора пароперегрівача котла ТП-100 за комплексного термомеханічного навантаження методом скінченних елементів / О. Ясній, Ю. Пиндус, В. Ясній // Вісник ТНТУ — Тернопіль : ТНТУ, 2014. — Том 74. — № 2. — С. 7-15. — (механіка та матеріалознавство).

УДК 539.3

**О. Ясній, канд. техн. наук; Ю. Пиндус, канд. техн. наук; В. Ясній**

*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя*

## **МОДЕЛЮВАННЯ НДС КОЛЕКТОРА ПАРОПЕРЕГРІВАЧА КОТЛА ТП-100 ЗА КОМПЛЕКСНОГО ТЕРМОМЕХАНІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

**Резюме.** Оцінено напружено-деформований стан колектора пароперегрівача котла ТП-100 із урахуванням впливу внутрішнього тиску пари та різниці температур на його внутрішній та зовнішній стінках. Основну увагу зосереджено на дослідженні НДС найбільш ймовірної ділянки руйнування – містка між отворами колектора пароперегрівача. Виявлено, що основне зростання напружень на цій ділянці спричиняє градієнт напружень по товщині стінки колектора (різниця між температурами зовнішньої та внутрішньої поверхонь). Досліджено, що найнебезпечнішими режимами експлуатації колектора є умови, коли температура зовнішньої поверхні перевищує температуру внутрішньої. Отримано залежності розподілу напружень у різних ділянках містка між отворами колектора від температурних режимів експлуатації та зроблено висновки щодо вірогідних причин виникнення пошкоджень.

**Ключові слова:** колектор пароперегрівача, сталь 12Х1МФ, напружено-деформований стан, термомеханічне навантаження, метод скінченних елементів.

**O. Yasniy, Yu. Pyndus, V. Iasnii**

## **MODELLING OF STRESS STRAIN STATE OF TYPE TP-100 BOILER SUPERHEATER COLLECTOR UNDER COMPLEX THERMO-MECHANICAL LOADING USING THE FINITE ELEMENT METHOD**

**Summary.** The power facilities, in particular, thermal power plants (TPPs) belong to the important objects, the failure of which can lead to accidents with severe consequences. The uninterrupted operation of TPPs greatly depends on the reliability of main elements of steam power systems. Therefore, one of the crucial tasks to be provided the structural integrity and life of the superheater collector is to increase the accuracy of its stress strain state estimation taking into account the thermo-mechanical loading.

In the study the stress strain state of type TP-100 boiler superheater collector was evaluated, taking into account the effect of internal steam pressure and temperature difference on its internal and external surfaces. The main attention is focused on the study of the stress strain state of the most probable collector failure area that is the ligament between the superheater collector holes. The impact of internal pressure and temperature changes on the internal and external surfaces on the stress-strain state of thermal power plant superheater collector during the starts and stops was modeled in elastic formulation using finite element method.

It was found out that the major stress increase in this area is caused by stress gradient through the thickness of the collector wall (the temperature difference between the external and internal surfaces). It was determined that the most dangerous modes of operation of the collector are the conditions when the temperature of the external surface exceeds the temperature of the internal surface. The dependences of the stress distribution on the temperature regimes of collector operation in different parts of the ligament between the holes and the conclusions about the likely causes of damage emergence were done.

For the studied temperature range (20-600°C) the stresses that arise in superheater depend only on the temperature difference between the internal and external surfaces and do not depend on their maximum values.

The most dangerous operation modes of superheater collector are when the temperature on its internal surface is lower than on the external. With the increase of this difference from 0 to 100°C the normal stress on the internal surface of the ligament between the superheater holes increases in 5 times and reaches 230 MPa, which exceeds the yield strength of the material at the temperature of 500°C.

**Key words:** superheater collector, 12Cr1MoV steel, stress strain state, thermo-mechanical loading, finite element method.

**Постановка проблеми.** Об'єкти енергетики, зокрема теплові електростанції (ТЕС), належать до категорії комплексів, руйнування яких матиме катастрофічні

наслідки. Безвідмовна робота електростанцій значною мірою залежить від надійності основних елементів пароводяної системи енергоблоків [1], до яких належать і колектори пароперегрівачів котлів. Проблема забезпечення надійності обладнання ТЕС посилюється їх тривалою експлуатацією, яка в багатьох випадках перевищує їх проектний ресурс, а також виявленими значними пошкодженнями колекторів пароперегрівачів.

За експлуатації в колекторах пароперегрівачів виникають напруження від внутрішнього тиску перегрітої водяної пари і температурними напруженнями, спричиненими різницею температур внутрішньої та зовнішньої поверхонь колектора під час пуску і зупинки блока. Тому одним із важливих завдань для забезпечення міцності й довговічності колектора є підвищення достовірності оцінювання його напружено-деформованого стану з урахуванням термомеханічного навантаження.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Враховуючи досвід та аналіз режимів експлуатації колекторів пароперегрівачів ТЕС [2–4], найбільш небезпечними ділянками з точки зору появи експлуатаційного пошкодження і дефектів є містки між отворами для приварювання патрубків подачі перегрітої пари. Аналізу напружено-деформованого стану колекторів пароперегрівачів присвячено багато праць, зокрема [4,7].

Комп'ютерним моделюванням досліджено деформування колектора пароперегрівача ТЕС під час експлуатації з використанням методу скінченних елементів [7]. Встановлено, що за умов стаціонарної експлуатації колектора інтенсивність напружень від внутрішнього тиску найбільша в околі отворів та сягає лише 0,43 від границі текучості  $\sigma_{0,2} = 290$  МПа, а осьові напруження у площині можливого виникнення тріщини  $\sigma_{yy} = 0,15\sigma_{0,2}$ . Проте температурні напруження внаслідок стрімкого охолодження гарячого колектора через потрапляння в окремі отвори води чи істотно холоднішої пари під час зупинки обладнання в аварійному чи плановому режимах найбільші ( $\sigma_{yy} = 533$  МПа) на центральному отворі за максимального перепаду температур у колекторі  $186^{\circ}\text{C}$ . Подібні результати отримано в роботі [4] на основі комп'ютерного моделювання МСЕ напружено-деформованого стану колектора пароперегрівача. Показано, що розтягувальні нормальні напруження на внутрішній поверхні колектора з'являються під час зупинки блока ТЕС. Найбільші осьові термічні напруження  $\sigma_{yy} = 142$  МПа досягаються на внутрішній поверхні центрального отвору при охолодженні колектора.

Проте у цих та інших роботах розраховано напружено-деформований стан лише при окремих експлуатаційних параметрах (внутрішній тиск, перепад температури зовнішньої і внутрішньої поверхонь колектора тощо) і не враховано вплив зміни цих параметрів на напружено-деформований стан, що дуже важливо для обґрунтування обмежень стосовно режимів експлуатації енергетичного обладнання з експлуатаційними пошкодженнями.

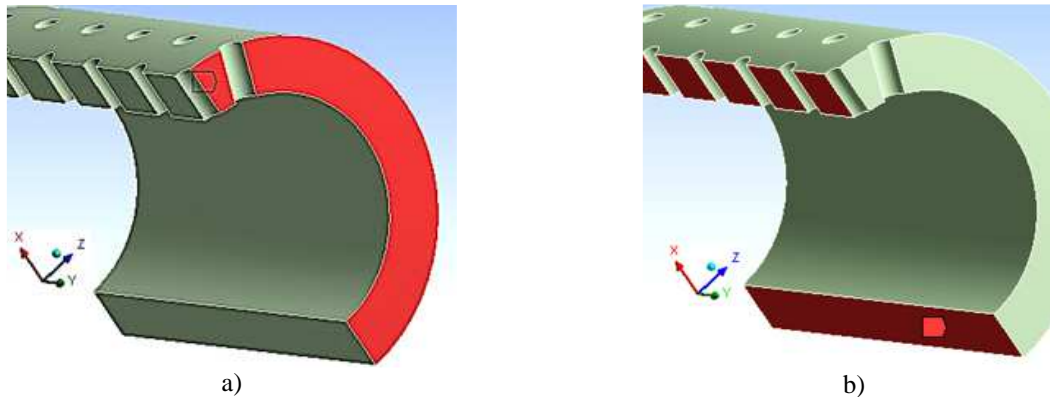
**Мета роботи.** Оцінити НДС колектора пароперегрівача котла ТП-100 із урахуванням впливу внутрішнього тиску пари та температури на його внутрішній та зовнішній стінках та виявити найнебезпечніші режими експлуатації.

**Моделювання колектора пароперегрівача МСЕ.** У програмному комплексі ANSYS Workbench створено повномасштабну модель колектора пароперегрівача котла ТП-100 у вигляді товстостінного циліндра з отворами (рис.1).

Модель побудовано у прямокутній декартовій системі координат. Внутрішній діаметр колектора становить 235 мм, зовнішній – 325 мм. Діаметр отворів 22 мм, кут між осями отворів у площині  $XOY$  дорівнює  $20^{\circ}$ . Відстань між рядами отворів уздовж осі  $OY$  становить 80 мм.

Розв'язували пружну тривимірну задачу. Враховуючи умови симетрії, розглядали фрагмент колектора пароперегрівача (рис.1). На поміченій червоним

кольором поверхні (рис. 1a, b) накладали умови симетрії відносно площини  $OXZ$  та  $OXY$  відповідно. Вузли скінченних елементів цих поверхонь обмежені у переміщеннях уздовж осей, нормальних до вказаних площин.



**Рисунок 1.** Повномасштабна тривимірна модель колектора пароперегрівача з заданими на її поверхнях крайовими умовами симетрії: а) відносно площини  $OXZ$ ; б) відносно площини  $OXY$

**Figure 1.** The full scale three-dimensional model of the superheater collector with the given on the surface symmetry boundary conditions: a) regarding the plane  $OXZ$ ; b) regarding the plane  $OXY$

Для достовірнішого відтворення поведінки матеріалу за комплексного термомеханічного впливу у скінченно-елементну модель колектора пароперегрівача заклали теплофізичні та фізико-механічні властивості сталі 12X1МФ [3], які представлені у табл.1.

**Таблиця 1**

Теплофізичні та фізико-механічні властивості сталі 12X1МФ

$t, ^\circ\text{C}$	Модуль пружності першого роду $E, \text{MPa}$	Умовна межа текучості $\sigma_{0,2}, \text{MPa}$	Коефіцієнт Пуассона $\mu$	Коеф. температурного розширення $\alpha, 1/^\circ\text{C}$	Коеф. теплопровідності, $K, \text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$
20	$1,98 \cdot 10^5$	305	0,27	–	–
100	$1,93 \cdot 10^5$	285	0,28	$1,24 \cdot 10^{-5}$	44
200	$1,88 \cdot 10^5$	255	0,29	$1,3 \cdot 10^{-5}$	44
300	$1,83 \cdot 10^5$	225	0,3	$1,36 \cdot 10^{-5}$	42
400	$1,75 \cdot 10^5$	215	0,315	$1,4 \cdot 10^{-5}$	40
500	$1,67 \cdot 10^5$	205	0,33	$1,44 \cdot 10^{-5}$	37
600	$1,57 \cdot 10^5$	175	0,34	$1,47 \cdot 10^{-5}$	35

Термомеханічний розрахунок МСЕ, виконаний в ANSYS Workbench, є міждисциплінарною задачею, яка пов'язує два етапи (програмні модулі) розрахунку – нелінійний тепловий «Transient Thermal» та статичний конструкційний «Static Structural». Платформа ANSYS Workbench дозволяє пов'язувати програмні модулі шляхом передачі (експорт-імпорт) результатів розрахунку з одного модуля в інший. У даному випадку результати теплових розрахунків, отримані в модулі «Transient Thermal», (розподіл температур у корпусі колектора) передавали у модуль «Static Structural» для подальших обчислень переміщень вузлів, деформацій та напружень унаслідок нерівномірного температурного розширення матеріалу по товщині корпусу колектора. Окрім того, з використанням опції «Static Structural» моделювали вплив тиску пари на внутрішні поверхні та отвори колектора пароперегрівача.

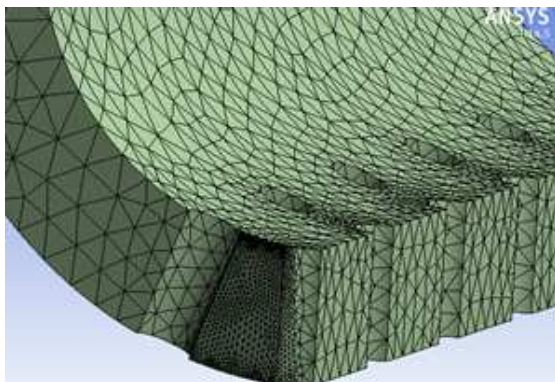
На першому етапі у модулі «Transient Thermal» виконували нелінійний розрахунок температурних полів із урахуванням зміни теплофізичних властивостей сталі (табл.1). Час модельованого нагрівання пароперегрівача в усіх програмних експериментах становив 140 s, що гарантовано забезпечує стабілізацію температурного поля в колекторі пароперегрівача. Ітераційні кроки зміни температури у стінці колектора пароперегрівача контролювались програмно. Мінімальний ітераційний крок становив 0,14 s, максимальний – 14 s.

Вплив температури перегрітої пари моделювали нагріванням внутрішньої поверхні та отворів колектора до заданої температури. На зовнішній поверхні задавали температуру газів згоряння палива, яка може відрізнятись від температури пари.

При тепловому розрахунку використовували тривимірний 10-вузловий скінченний елемент SOLID87, який має один ступінь вільності у кожному вузлі – температуру та придатний до застосування в 3-D моделях складної криволінійної форми для розрахунку стаціонарного або транзитного (перехідного) теплового аналізу. Якщо модель, яка містить цей елемент, планується до подальших структурних розрахунків у модулі «Static Structural» то цей скінченний елемент повинен бути замінений еквівалентним 10-вузловим структурним елементом, наприклад SOLID187.

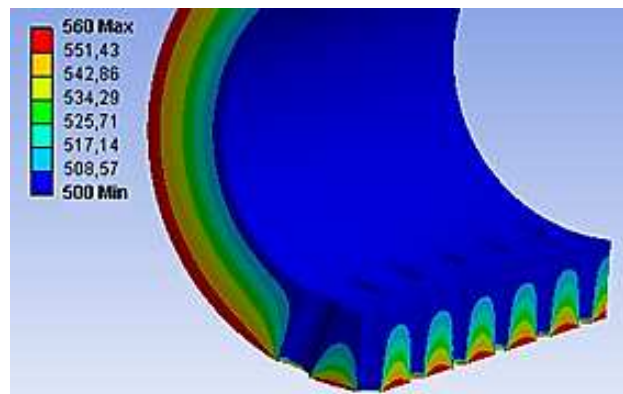
Розбивку моделі на скінченні елементи проводили автоматизовано, використовуючи опції «Automatic Method» (рис.2). На ділянці між отворами, де найбільш ймовірно виникає тріщина, сітку згущували. Загальна кількість елементів у моделі становить 62140. Найменший розмір SE складає 0,142 mm в ділянці згущення, тоді як найбільший розмір – 14 mm.

Результати типового розрахунку розподілу температурного поля після 140 s прикладання температурних умов на внутрішній і зовнішній поверхнях колектора в модулі «Transient Thermal» зображено на рис.3.



**Рисунок 2.** Скінченноелементна 3-D модель колектора

**Figure 2.** Finite element 3-D collector model



**Рисунок 3.** Типовий розподіл температурного поля колектора пароперегрівача при температурі внутрішньої поверхні 500°C, зовнішньої – 560°C

**Figure 3.** Typical distribution of temperature field in superheater collector at internal surface temperature of 500°C and external surface temperature of 560°C

На наступному етапі отримані в «Transient Thermal» результати експортували в модуль «Static Structural» та обчислювали напружено-деформований стан колектора пароперегрівача, враховуючи нерівномірне теплове розширення матеріалу по товщині стінки.

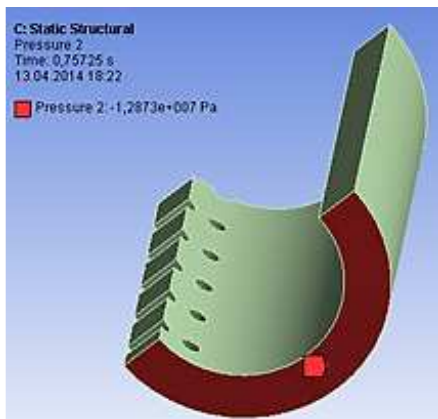
Розбивка 3-D моделі на скінченні елементи у цьому модулі аналогічна попередній. Різниця полягає лише в заміні скінченного елемента SOLID87 на SOLID187. SOLID187 є 3-D елементом, який складається з 10 вузлів, кожен з яких має три ступеня вільності: переміщення у вузлових напрямках  $Ox$ ,  $Oy$  та  $Oz$ , а також

має властивості пружності, пластичності, гіперпружності, повзучості, жорсткості, великих прогинів та деформацій. Елемент може навантажуватися зусиллями, напруженнями, переміщеннями та температурними впливами як окремо, так і комбіновано [5].

З урахуванням температури вузлів скінченних елементів, відповідно до коефіцієнтів теплового розширення матеріалу за змінних температур у «Static Structural» обчислювали переміщення вузлів, деформації та оцінювали напружений стан у трьох напрямках  $OX$ ,  $OY$  та  $OZ$ . Слід зауважити, що напружено-деформований стан моделювали, враховуючи температурні зміни механічних властивостей матеріалу (коефіцієнта теплового розширення, теплопровідності та пружних характеристик) (табл.1).

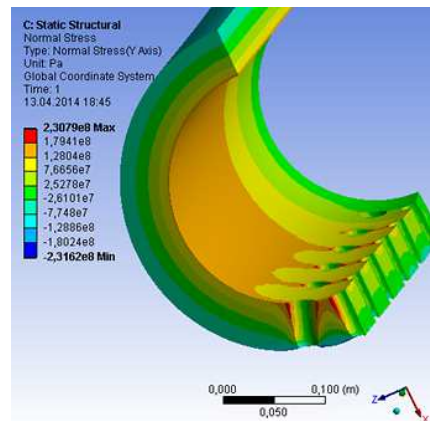
Крім температурного впливу, внутрішні поверхні та отвори моделі навантажували тиском 14 МПа. Діючий на торцеву заглушку тиск моделювали еквівалентним тиском (-12,87) МПа, прикладеним до показаної на рис.4 поверхні.

Результати типового розрахунку нормальних до площини  $OXZ$  напружень  $\sigma_{yy}$  за впливу внутрішньої температури 500°C, зовнішньої 560°C та внутрішнього тиску 14 МПа зображено на рис.5.



**Рисунок 4.** Поверхня колектора, навантажена еквівалентним тиском на торцеву заглушку

**Figure 4.** The surface of collector, loaded with equivalent pressure on the socket stub



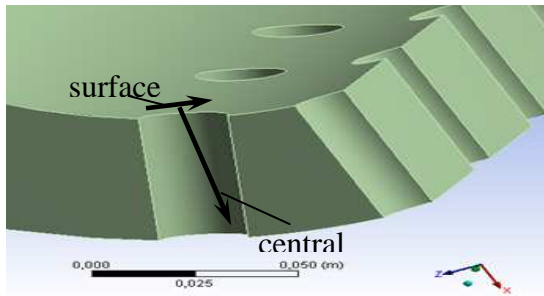
**Рисунок 5.** Типовий розподіл нормальних напружень  $\sigma_{yy}$  у колекторі пароперегрівача за внутрішнього тиску 14 МПа та температури внутрішньої поверхні 500°C, зовнішньої 560°C

**Figure 5.** Typical distribution of normal stress  $\sigma_{yy}$  in superheater collector under internal pressure 14 MPa, internal surface temperature of 500°C and external surface temperature of 560°C

Очевидно, що у даному випадку найбільші напруження  $\sigma_{yy} = 230$  МПа виникають у площині  $OXZ$  між містками отворів на внутрішній поверхні колектора пароперегрівача, що може призводити до появи втомних тріщин у реальних конструкціях за експлуатаційних умов.

**Результати розрахунку НДС колектора пароперегрівача МСЕ.** На 3-D моделі (рис.6) зображені лінії «surface» і «central», уздовж яких будували криві розподілу напружень. Лінії «surface» і «central» визначені у місцях максимальної концентрації напружень, де втомні тріщини виникають найбільш ймовірно.

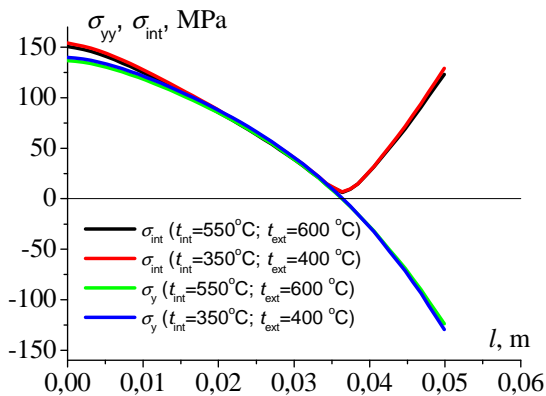




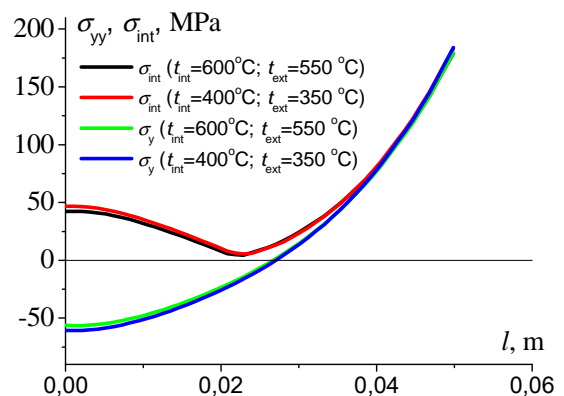
**Рисунок 6.** Лінії найбільшої концентрації напружень перфорованої ділянки колектора

**Figure 6.** The lines of main stress concentration of perforated collector region

Для оцінювання впливу температурних режимів експлуатації на внутрішній та зовнішній поверхнях колектора задавали різні температури  $t_{int}$  та  $t_{ext}$  відповідно. Різницю температур  $\Delta t = |t_{int} - t_{ext}|$  зберігали сталою і рівною  $50^\circ\text{C}$ . На рис.7 зображено отримані в результаті чисельного експерименту криві розподілу інтенсивності напружень  $\sigma_{int}$  та нормальних напружень  $\sigma_{yy}$  уздовж лінії «central» при  $t_{int} < t_{ext}$  (рис.7а) та при  $t_{int} > t_{ext}$  (рис.7б). Для оцінювання впливу абсолютних температур на напружено-деформований стан, обчислення виконували за різних діапазонів температур  $t_{int}$  та  $t_{ext}$ . У всіх комп'ютерних експериментах тиск на внутрішні стінки та отвори колектора становив 14 МПа.



a)



b)

**Рисунок 7.** Розподіл напружень  $\sigma_{int}$  та  $\sigma_{yy}$  вздовж лінії «central» при вищій на  $50^\circ\text{C}$  температурі: а) зовнішньої поверхні; б) внутрішньої поверхні

**Figure 7.** The distribution of stresses  $\sigma_{int}$  and  $\sigma_{yy}$  along the line «central» at temperature, greater on  $50^\circ\text{C}$  on: a) external surface; b) internal surface

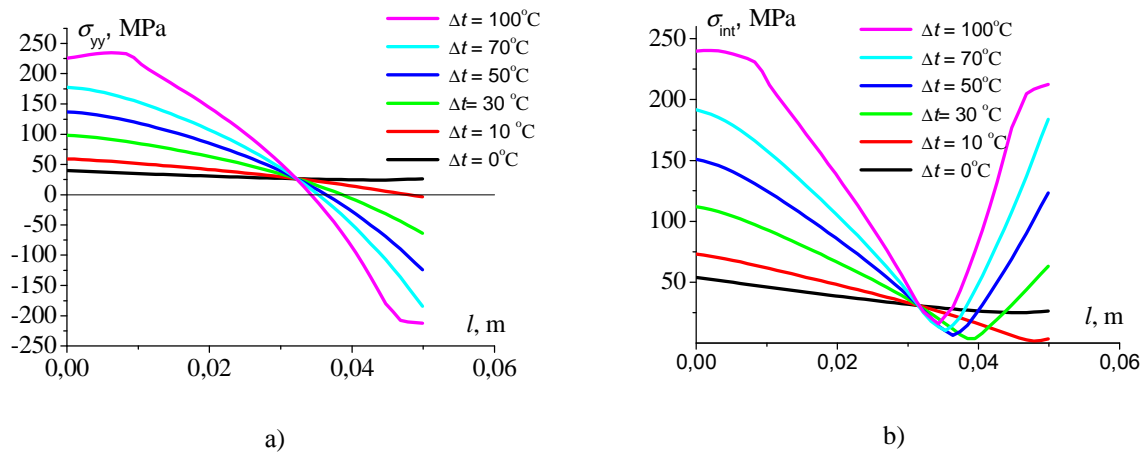
Отримані результати (рис.7а) вказують на те, що найбільше зростання інтенсивності напружень  $\sigma_{int}$  та нормальних напружень  $\sigma_{yy}$  на ділянці між отворами вздовж лінії «central» спостерігається за умов, коли внутрішня температура є нижчою від зовнішньої. Основний вклад в інтенсивність напружень  $\sigma_{int}$  вносять нормальні напруження  $\sigma_{yy}$ , про що свідчить накладання відповідних кривих за додатних значень  $\sigma_{yy}$  (рис.7а,б).

За умови  $t_{\text{int}} > t_{\text{ext}}$  (рис.7b) напруження  $\sigma_{yy}$  приблизно втричі більші з боку зовнішньої поверхні містка колектора порівняно із внутрішньою поверхнею, а на внутрішній поверхні вони втричі менші, ніж за умови  $t_{\text{int}} < t_{\text{ext}}$ .

Накладання кривих (рис.7a,b) у різних досліджених діапазонах температур свідчить про те, що напруження, які виникають у матеріалі пароперегрівача, залежать тільки від різниці температур внутрішньої та зовнішньої поверхонь і не залежать від їх абсолютних значень.

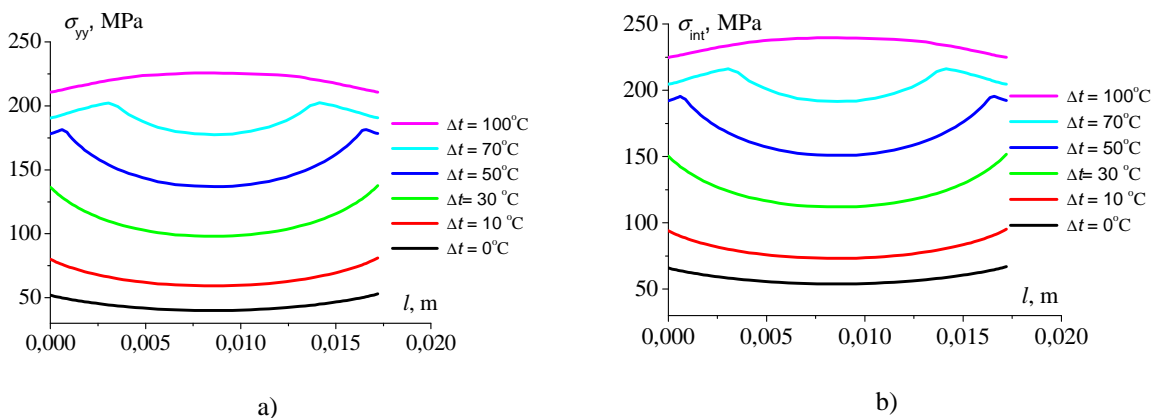
Подальші дослідження впливу різниці внутрішньої та зовнішньої температур на НДС виконували за умов  $t_{\text{int}} < t_{\text{ext}}$  та ступінчастої зміни  $\Delta t$ , які є найнебезпечнішими з точки зору виникнення пошкоджень у містку між отворами колектора пароперегрівача.

Результати програмного моделювання свідчать, що при ступінчастому зменшенні температури внутрішньої поверхні відносно зовнішньої зростають напруження в середній між отворами ділянці вздовж лінії «central» та вздовж лінії «surface» (рис.8, рис.9). При  $\Delta t = 0$  в матеріалі виникають безпечні напруження, які спричинені тільки внутрішнім тиском.



**Рисунок 8.** Розподіл нормальних напружень  $\sigma_{yy}$  (a) та інтенсивності напружень  $\sigma_{\text{int}}$  (b) уздовж лінії «central» за умови  $t_{\text{int}} < t_{\text{ext}}$  та ступінчастої зміни  $\Delta t$

**Figure 8.** The distribution of normal stress  $\sigma_{yy}$  (a) and stress intensity  $\sigma_{\text{int}}$  (b) along the line «central» under the condition  $t_{\text{int}} < t_{\text{ext}}$  and stepped variation of  $\Delta t$



**Рисунок 9.** Розподіл нормальних напружень  $\sigma_{yy}$  (a) та інтенсивності напружень  $\sigma_{\text{int}}$  (b) уздовж лінії

«surface» за умови  $t_{\text{int}} < t_{\text{ext}}$  та ступінчастої зміни  $\Delta t$

**Figure 9.** The distribution of normal stress  $\sigma_{yy}$  (a) and stress intensity  $\sigma_{\text{int}}$  (b) along the line "surface" under the condition  $t_{\text{int}} < t_{\text{ext}}$  and stepped variation of  $\Delta t$

Якщо різниця температур зростає ( $\Delta t > 50$ ), то найбільше нормальне напруження  $\sigma_{yy}$  уздовж лінії «surface» починає зміщуватися від країв суміжних отворів до середини ділянки між отворами (рис.9).

**Висновки.** Методом скінченних елементів у пружній постановці змодельовано вплив внутрішнього тиску і перепаду температур між внутрішньою і зовнішньою поверхнями колектора пароперегрівника ТЕС за експлуатаційних умов на його напружено-деформований стан.

Виявлено, що для дослідженого діапазону температур (20–600°C) напруження, які виникають у пароперегрівачі за сталого тиску перегрітої пари, залежать тільки від різниці температур внутрішньої та зовнішньої поверхонь і не залежать від їх максимальних значень.

Найнебезпечнішими для експлуатації колектора пароперегрівача є режими, коли температура його внутрішньої поверхні нижча від зовнішньої. При збільшенні вказаної різниці від 0 до 100°C нормальні напруження на внутрішній поверхні містка між отворами пароперегрівача зростають у 5 разів і сягають 230 МПа, що перевищує умовну межу текучості матеріалу за температури 500°C.

Вплив лише тиску перегрітої пари (при  $\Delta t = 0^\circ\text{C}$ ) на НДС колектора пароперегрівача є незначним і спричиняє в матеріалі між суміжними отворами колектора пароперегрівача напруження  $\sigma_{\text{int}} < 75\text{МПа}$ .

**Conclusions.** The impact of internal pressure and temperature changes on the internal and external surfaces (operating conditions) on the stress-strain state of thermal power plant superheater collector was modeled in elastic formulation using finite element method.

It was found out that for the studied temperature range (20–600°C) the stresses that arise in superheater depend only on the temperature difference between the internal and external surfaces and do not depend on their maximum values.

The most dangerous operation modes of superheater collector are when the temperature on its internal surface is lower than on the external. With the increase of this difference from 0 to 100°C the normal stress on the internal surface of the ligament between the superheater holes increases in 5 times and reaches 230 МПа, which exceeds the yield strength of the material at the temperature of 500°C.

#### Список використаної літератури

1. Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посібник [Текст] / за заг. ред. Панасюка В.В. – Т.7: Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування / І.М. Дмитрах, А.Б. Вайнман, М.Г. Стащук, Л. Тот; за ред. І.М. Дмитраха. – Київ: ВД "Академперіодика", 2005. – 378 с.
2. Пошкодження внутрішньої поверхні ділянки колектора пароперегрівника під час експлуатації [Текст] / О.Ясній, А. Собчак, В. Ясній, Н. Луцик // Машинознавство. – 2011 – № 1–2. – С.16–19.
3. Оцінка експлуатаційної деградації матеріалу колектора пароперегрівника [Текст] / О. Ясній, Т. Вухерер, В. Ясній, А. Собчак, А. Сорочак // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2011. – № 1. – С. 7–15.
4. Kwon, O. The effect of the steam temperature fluctuations during steady state operation on the remnant life of the superheater header / O. Kwon, M. Myers, A.D. Karstensen, D. Knowles // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2006. – Vol. 83, Issue 5. – P.349–358.
5. ANSYS Mechanical APDL Theory Reference. Release 14.5. <http://www.mecheng.osu.edu/>
6. Марочник сталей и сплавов. 2-е изд., доп. и испр. [Текст] / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский и др.: под общей ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
7. Дробенко, Б.Д. Комп'ютерне моделювання деформування елементів діючого енергетичного



обладнання з пошкодженнями [Текст] / Б.Д. Дробенко // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2010. – № 6. – С.56–60.

*Отримано 15.04.2014*