

# Вплив коефіцієнта тепловіддачі на рівень залишкових напружень після термообробки вигородки реактора ВВЕР-1000

О.В. Махненко<sup>1</sup> • С.М. Кандаля<sup>1</sup> • Н.Р. Басистюк<sup>1</sup>

Received: 3 September 2021 / Accepted: 25 October 2021

**Проблематика.** Вдосконалення методики розрахункового аналізу залишкових напружень в конструкційних елементах реактора є невід'ємною частиною робіт при подовженні ресурсу енергоблоків АЕС у понадпроектний термін експлуатації.

**Мета дослідження.** Визначити рівень залишкових технологічних напружень, які утворюються у вигородці реактора ВВЕР-1000 в процесі зварювання та подальшої термообробки за режимом аустенізації з урахуванням і без урахування залежності коефіцієнта тепловіддачі від температури поверхні зразка в процесі охолодження на повітрі при проведенні термообробки.

**Методика реалізації.** Чисельне моделювання напружено-деформованого стану вигородки в процесі зварювання та подальшої термообробки було проведено за допомогою методу скінченних елементів.

**Результати дослідження.** Було виявлено, що в процесі термообробки за режимом аустенізації залишкові зварювальні напруження у вигородці майже повністю релаксують. За рахунок високого градієнту температур під час швидкого охолодження на повітрі після нагріву в процесі аустенізації в зонах вигородки з найбільшою товщиною метала утворюються нові досить високі залишкові напруження.

**Висновки.** За результатами дослідження було визначено високий рівень залишкових технологічних напружень, які слід враховувати при розрахунковому обґрунтуванні подовження ресурсу вигородки реактора ВВЕР-1000.

**Ключові слова:** реактор ВВЕР-1000; внутрішньокорпусні пристрої; вигородка; зварювання; термообробка, аустенізація; залишкові напруження; математичне моделювання.

## Вступ

В теперішній час в Україні більшість енергоблоків типу ВВЕР-1000 працюють у понад-проектному режимі за терміном експлуатації. Обґрунтування подовження ресурсу конструкційних елементів реактора, таких як внутрішньо-корпусні пристрої (ВКП), проводиться за допомогою розрахункових методів, а точність розрахунків, задля коректної оцінки терміну безпечної експлуатації енергоблоків, повинна постійно підвищуватися.

При подовженні ресурсу експлуатації ВКП найбільш актуальною є проблема радіаційного розпухання конструкційної сталі 08X18H10T, зокрема через

деградацію механічних властивостей матеріалу (радіаційне окрихчення) та прогресуючу формозміну, що може призвести до крихкого руйнування, а також до контакту між вигородкою та шахтою внутрішньо корпусною (ШВК). Зона можливого контакту, який є недопустимим в процесі експлуатації, позначена на Рис. 1. Зазвичай, при розрахунковому обґрунтуванні продовження ресурсу ВКП ВВЕР-1000 технологічні залишкові напруження після зварювання і наступної термообробки не враховують [1, 2], так як вважається, що їх рівень досить низький [3] та не впливає на НДС конструкції в цілому.

Згідно з вимогами нормативних документів [4] всі зварні з'єднання елементів обладнання АЕС з аустенітної сталі після електрошлакового зварювання піддаються термообробці за режимом аустенізації, процес якої передбачає нагрів до 1100°C, короткочасну витримку і швидке охолодження на повітрі. Як видно з Рис. 1

✉ О. В. Махненко  
makhnenko@raton.kiev.ua

<sup>1</sup> Інститут електрозварювання ім. С.О. Патона, Київ, Україна

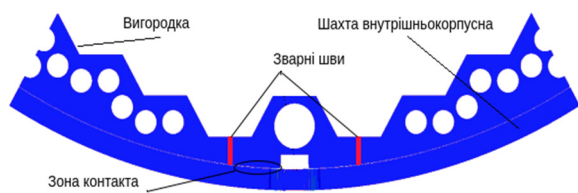


Рис. 1. Схема розташування поздовжніх зварних з'єднань в перерізі вигородки

геометрія вигородки є неоднорідною по товщині, тобто в процесі охолодження можуть виникати значні температурні градієнти, що може призвести до утворення високих залишкових напружень в об'ємі вигородки.

**Метою роботи** є за допомогою математичного моделювання визначити розподіли залишкових напружень в об'ємі вигородки після процесу електрошлакового зварювання з подальшою термообробкою за режимом аустенізації та показати вплив значення коефіцієнта тепловіддачі на їх рівень.

### Методика

Завдання визначення НДС елементів ВКП вирішувалася за допомогою скінченно-елементного моделювання. Краєві задачі з визначення температурних полів і НДС розв'язувалися в двовимірній постановці в поперечному перерізі (Рис.1). Якщо процеси в цьому перетині цілком усталені, то можна вважати, що градієнт напружень і деформацій уздовж поздовжньої осі  $z$  вигородки дорівнює нулю. Це припущення відповідає умові узагальненої “плоскої деформації”. З огляду на великогабаритні розміри вигородки ВКП (діаметр 3500 мм, товщина 67–242 мм), а також наявність циклічної симетрії в їх конструкції, розроблена скінченно-елементна модель являє собою 30 градусний сектор, що складається з плоских чотирикутних елементів з розміром граней, що не перевищує 5 мм.

При моделюванні температурних полів застосовувалося рівняння нестационарної теплопровідності, яке включає в себе врахування об'ємного зварювального джерела нагріву  $W(x, y, t)$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + W(x, y, t) = c \rho \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

де  $\rho$  – щільність матеріалу,  $c$  – питома теплоємність,  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності,  $T$  – температура матеріалу.

Граничні умови на поверхнях елементів ВКП з урахуванням конвекційного теплообміну з навколишнім середовищем задавалися у вигляді:

$$q = -\alpha(T_{out} - T), \quad (2)$$

де  $T_{out}$  – температура довколишнього середовища,  $q$  – тепловий потік,  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі.

Температурна задача при зварюванні поздовжнього з'єднання вигородки вирішувалась при допущенні швидкорухомого джерела нагріву, а при термообробці нагрівання здійснювалось шляхом конвекційного теплообміну поверхні вигородки з навколишнім середовищем в печі.

З урахуванням гіпотези “плоскої деформації” рішення задачі по визначенню розподілів просторових компонент напружень і деформацій отримано в пружно-в'язкопластичній постановці, тобто тензор деформацій може бути представлений у вигляді суми тензорів [5]:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^{cr} \quad (i, j = x, y, z), \quad (3)$$

де  $\varepsilon_{ij}^e$  – тензор пружних деформацій,  $\varepsilon_{ij}^p$  – тензор пластичних деформацій,  $\varepsilon_{ij}^{cr}$  – тензор деформацій повзучості. Компоненти тензорів напружень  $\sigma_{ij}$  та пружних деформацій  $\varepsilon_{ij}^e$  пов'язані законом Гука:

$$\varepsilon_{ij}^e = \frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma}{2G} + \delta_{ij} (K \sigma + \varphi), \quad (4)$$

де,  $G$  – модуль зсуву,  $K$  – модуль об'ємного стиснення,  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона,  $\varphi$  – вільні відносні температурні подовження:

$$\varphi = \alpha(T - T_0), \quad (5)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт відносного температурного видовження матеріалу.

Пластичні деформації пов'язані з напруженим станом рівнянням теорії пластичної неізотермічної течії, асоційованої з умовою текучості Мізеса:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \cdot (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma) \quad (i, j = x, y, z), \quad (6)$$

Швидкість деформацій повзучості визначалася за допомогою закону Бейлі-Нортонна [6], де коефіцієнти  $A$ ,  $n$  залежать від матеріалу і температури:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{cr} = A \cdot \sigma_{eq}^n. \quad (7)$$

### Чисельні розрахунки

#### Моделювання зварювання

Схеми розташування поздовжніх зварних з'єднань вигородки, виконаних за один прохід за допомогою електрошлакової технології, представлені на Рис. 1. Товщина вигородки в зоні зварних з'єднань 70 мм, ширина з'єднань становить приблизно 30 мм, потужність джерела зварювання 9 кВт, максимальна температура рідкометалічної ванни складає 2000°C, швидкість зва-

рювання 0,42 мм/с [3]. Тепловий ККД процесу електрошлакового зварювання при моделюванні був прийнятий на рівні 85%. Температурна задача вирішувалася при допущенні швидко рухомого джерела нагріву, що дозволило використовувати двомірну кінцево-елементну модель в поперечному перерізі вигородки. Граничні умови на поверхнях вигородки з урахуванням конвекційного теплообміну з навколишнім середовищем задавалися величиною коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha = 20 \text{ Вт/м}^2\text{°C}$ , постійним у всьому діапазоні температури нагріву.

#### Моделювання післязварювальної термообробки.

Згідно з [7] аустенізацію виробів необхідно проводити за наступним режимом: нагрів до 1100 °С, витримка і охолодження на повітрі, час витримки для вигородки складає приблизно 1,5 год.

Тривалий процес нагріву зварного конструкційного елемента до температури аустенізації викликає процеси високотемпературної повзучості в матеріалі, що призводить до релаксації залишкових напружень в зоні зварних з'єднань. При визначенні швидкості деформацій температурної повзучості для аустенітної сталі 08X18H10T можуть бути прийняті наступні коефіцієнти  $A = 6.948 \cdot 10^{-14}$ ,  $n = 6.22$  [8] при температурі 700 °С (973К).

#### Граничні умови

Граничні умови (2) залежать від коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  з поверхні деталі, значення якого при охолодженні вигородки на спокійному повітрі варіюється в діапазоні 14...250 Вт/м<sup>2</sup>°С в залежності від температури поверхні. Згідно з [9] коефіцієнт тепловіддачі сталі при охолодженні на спокійному повітрі для температури поверхні 1100 °С може досягати 160 Вт/м<sup>2</sup> °С, а в [10] рівень коефіцієнта тепловіддачі сталі 08X18H10T при високих температурах поверхні може досягати 260 Вт/м<sup>2</sup> °С. Таким чином було розглянуто два варіанта завдання граничних умов:

1) коефіцієнт тепловіддачі з поверхонь елементів ВКП при конвекційному теплообміні з навколишнім середовищем в печі і на спокійному повітрі приймався рівним значенню  $\alpha = 30 \text{ Вт/м}^2\text{°C}$ , постійним у всьому діапазоні температури нагріву;

2) коефіцієнт тепловіддачі був описаний апроксимувальною функцією експериментальних даних [10] (Рис. 2) в залежності від температури поверхні вигородки ВКП. Такий метод дозволяє більш точно оцінити НДС вигородки за рахунок простеження зміни коефіцієнта тепловіддачі в кожний момент часу та в кожному вузлі поверхні скінченно-елементної моделі. Функція залежності коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  від температури  $T$  поверхні зразка під час його охолодження на повітрі побудована за допомогою кубічного регресійного аналізу:

$$\alpha(T) = 10^{-8} \cdot T^3 + 2.4 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 8.4 \cdot 10^{-2} \cdot T + 8.8 \quad (8)$$

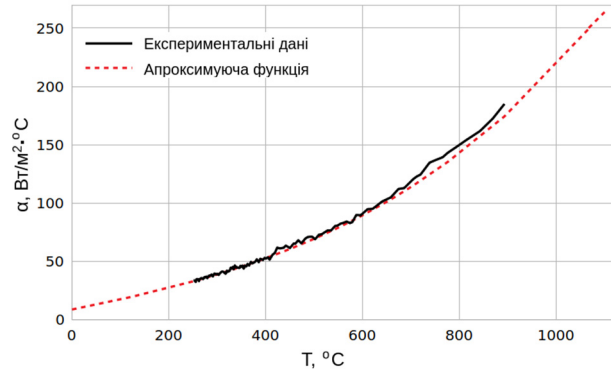


Рис. 2. Залежність коефіцієнта тепловіддачі від температури зразка під час його охолодження на повітрі [10]

#### Результати і їх обговорення

Отримані результати математичного моделювання напруженого стану показали, що локальний високотемпературний нагрів при ЕШЗ і подальше охолодження призводить до утворення в розглянутих елементах ВКП високих залишкових напружень розтягу до 230 МПа в осьовому напрямку в зоні зварного шва, тобто до межі текучості матеріалу, а в радіальному і окружному напрямках внаслідок рівномірності зварювального нагріву по товщині при ЕШЗ до більш низького рівня залишкових напружень до 50 МПа [11].

В процесі післязварювальної термообробки за режимом аустенізації під час нагріву вигородки до температури до 1100 °С залишкові зварювальні напруження майже повністю релаксують. Але, в процесі подальшого охолодження на повітрі при термообробці геометрична неоднорідність вигородки суттєво впливає на нерівномірне охолодження конструкції в результаті інтенсивного теплообміну з поверхнею. За рахунок високого градієнту температур в процесі аустенізації в зонах вигородки з найбільшою товщиною метала утворюються нові досить високі залишкові напруження.

Результати розрахунків (Рис. 3) показали, що охолодження на повітрі призводить до виникнення істотної різниці температур на поверхні та в об'ємі вигородки, а саме до 250°С при незмінному коефіцієнті тепловіддачі і до 400°С при використанні функції (8) залежності коефіцієнта тепловіддачі від температури на поверхні вигородки. Також слід зазначити, що швидкість охолодження у випадку використання залежності коефіцієнта тепловіддачі від температури матеріалу вигородки значно вища (Рис. 3).

Як наслідок, утворюються нові високі залишкові напруження (Рис. 4, Рис. 5). Як видно з Рис. 4, що зі сталим коефіцієнтом тепловіддачі рівень залишкових напружень після процесу аустенізації в осьовому напрямку досить високий і в зонах ближче до зовнішньої

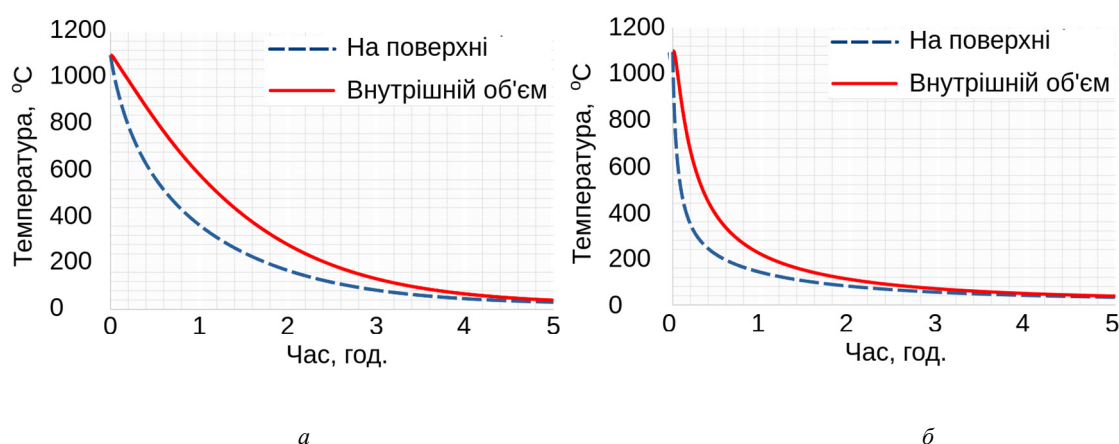


Рис. 3. Максимальна різниця температур на поверхні та в об'ємі вигордки в процесі охолодження при аустенізації з використанням сталого коефіцієнта  $\alpha$  (а) та з урахуванням його залежності від температури поверхні вигордки (б)

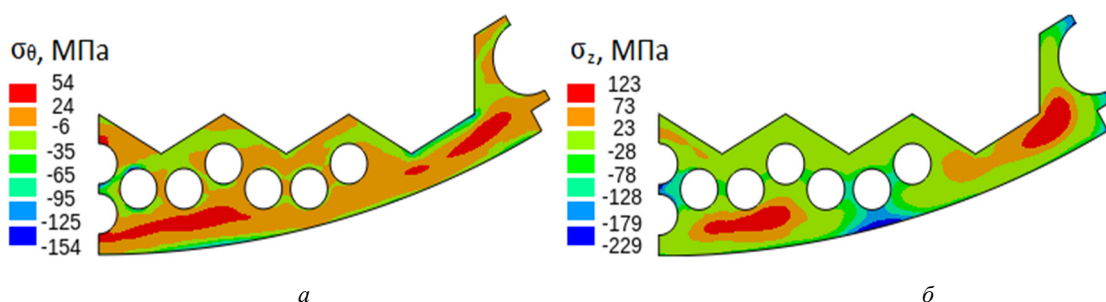


Рис. 4. Залишкові напруження вигордки після зварювання і аустенізації в окружному (а) і осьовому (б) напрямках зі сталим коефіцієнтом теплопровідності

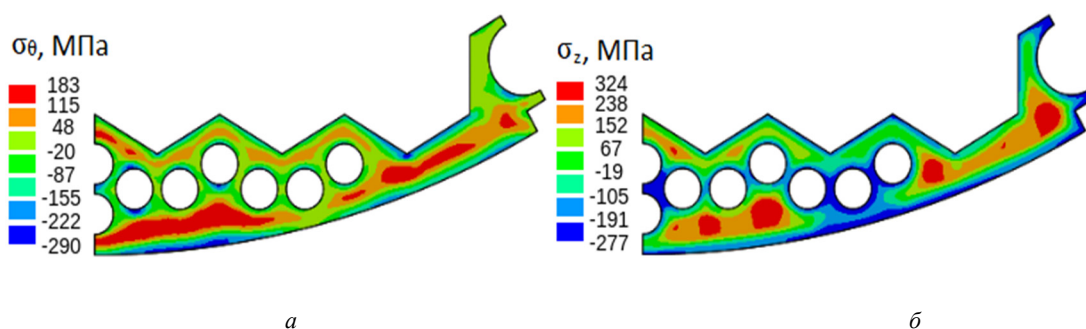


Рис. 5. Залишкові напруження вигордки після зварювання і аустенізації в окружному (а) і осьовому (б) напрямках з урахуванням залежності коефіцієнта теплопровідності від температури поверхні вигордки

поверхні вигордки напруження розтягу досягають 123 МПа. При використанні функції (8) залежності значення коефіцієнта теплопровідності від температури визначено значно вищі значення залишкових розтягуючих напружень в окружному та осьовому напрямках на рівні 180 МПа та 320 МПа, які утворилися біля зовнішньої стінки вигордки в області з найбільшою товщиною, де градієнти температури в процесі охолодження найвищі.

Порівняння результатів моделювання залишкових напружень після процесу аустенізації в залежності від метода завдання граничних умов (Рис. 4 та Рис. 5) показало, що варіант завдання граничних умов, який враховує залежність коефіцієнта теплопровідності від температури поверхні вигордки, є більш консервативним, і саме ці результати (Рис. 5) доцільно враховувати при проведенні розрахункового обґрунтування подовження ресурсу експлуатації ВКП ВВЕР-1000.

## Висновки

В результаті проведеного чисельного дослідження визначено, що залишкові зварювальні напруження у вигородці енергоблоку ВВЕР-1000 під час нагріву в процесі післязварювальної термічної обробки за режимом аустенізації в значній мірі релаксують, однак, при подальшому інтенсивному охолодженні на повітрі за рахунок виникнення істотного градієнта температур утворюються нові високі залишкові напруження, які

необхідно враховувати при визначенні ресурсу ВКП ВВЕР-1000. Врахування залежності коефіцієнту тепловіддачі від температури поверхні вигородки при визначенні залишкових технологічних напружень є доцільним з точки зору забезпечення необхідної консервативності результатів розрахунків. В перспективі планується розглянути вплив визначених залишкових технологічних напружень на НДС вигородки в процесі довгострокової експлуатації енергоблоку типу ВВЕР-1000.

## References

- [1] A.Y. Chirkov and V.V. Kharchenko, "Special features of computational assessment of the change in shape of WVER-1000 reactor core baffle in view of irradiation-induced swelling," *Strength of Materials*, Vol. 52, pp. 339–352, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00184-9>
- [2] A.S. Kalchenko, and V.V. Bryk, "Prediction of radiation swelling of the VVER-1000 reactor baffle for an operation period of 30–60 years," *Problems of Atomic Science and Technology*, pp. 69–78, 2011.
- [3] O.V. Makhnenko, and I.V. Mirzov, "Modeling of residual welding stresses, radiation swelling and stress state of a VVER-1000 reactor baffle during operation," *Automatic Welding*, pp. 35–41, 2016. <https://doi.org/10.15407/as2016.04.03>
- [4] "Welding and surfacing of equipment and pipelines of nuclear power plants with VVER reactors," NAEK "ENERGOATOM" Standard SOU NAEK 159: 2020.
- [5] V.I. Makhnenko, *Calculation methods for investigation the kinetics of welding stresses and deformations*. Kiev, Ukraine: Naukova Dumka, 1976.
- [6] Y.N. Rabotnov, *Creep of structural elements*. Moscow, Russia: Nauka, 1966.
- [7] "Heat treatment of corrosion-resistant steels and iron-nickel-based alloys in chemical engineering," JSC "NIIKHIMMASH" Standard STP 26.260.484-2004, 2004.
- [8] B.Z. Margolin, and A.G. Gulenko, "Modeling for fracture in materials under long-term static creep loading and neutron irradiation. Part 2. Prediction of creep rupture strength for austenitic materials", *Strength of Materials*, Vol. 38, pp. 449–457, 2006. <https://doi.org/10.1007/s11223-006-0064-z>
- [9] A.L. Nemchinsky, *Thermal calculations of heat treatment*. Leningrad: State Publishing house shipbuilding literature, 1953.
- [10] M.V. Maisuradze et al., "Methodology for determining the cooling capacity of hardening media," *Innovations in materials science and metallurgy: materials of the 4<sup>th</sup> International interactive scientific and practical conference*, Yekaterinburg, Russia, 2015, pp. 114–117.
- [11] O.V. Makhnenko, and S.M. Kandala, "Mathematical modeling of residual stresses in WVER-1000 elements after heat treatment," *Automatic Welding*, pp. 10–16, 2021. <https://doi.org/10.37434/as2021.03.02>

## Influence of the heat transfer coefficient on the level of residual stress after heat treatment of the VVER-1000 reactor baffle

O.V. Makhnenko, S.M. Kandala, N.R. Basistyuk

**Background.** Improvement of the methodology for the computational analysis of residual stresses in the structural elements of the reactor is an integral part of the work when extending the service life of NPP power units.

**Objective.** Determine the value of residual technological stress arising in the baffle of a VVER-1000 reactor during welding and postweld heat treatment according to the austenitizing mode. To evaluate the effect of considering the dependence of the heat transfer coefficient on the temperature of the baffle surface at cooling in air during heat treatment.

**Methods.** Numerical modeling of the stress-strain state of the baffle during welding and postweld heat treatment was carried out using the finite element method.

**Results.** It was determined that in the process of heat treatment according to the austenitizing mode, the residual welding stress in the baffle are almost completely relaxed. Due to the high temperature gradient during rapid cooling in air after heating in the process of austenitization, new rather high residual stresses are formed in the zones of the baffle with the greatest metal thickness.

**Conclusions.** Based on the results of the investigation, a high level of residual technological stress was determined, which should be considered when calculating the justification for extending the service life of the VVER-1000 reactor baffle.

**Keywords:** VVER-1000 reactor, internals, baffle, welding, heat treatment, austenitization, residual stresses, mathematical modeling.

## Влияние коэффициента теплоотдачи на уровень остаточных напряжений после термообработки выгородки реактора ВВЭР-1000

О.В. Махненко, С.М. Кандала, Н.Р. Басистюк

**Проблематика.** Совершенствование методики расчетного анализа остаточных напряжений в конструкционных элементах реактора является неотъемлемой частью работ при продлении ресурса энергоблоков АЭС сверх проектного срока эксплуатации.

**Цель исследования.** Определить уровень остаточных технологических напряжений, возникающих в выгородке реактора ВВЭР-1000 в процессе сварки и последующей термообработки по режиму аустенизации с учетом и без учета зависимости коэффициента теплоотдачи от температуры поверхности образца в процессе охлаждения на воздухе при проведении термообработки.

**Методика реализации.** Численное моделирование напряженно-деформированного состояния выгородки в процессе сварки и последующей термообработки было проведено с помощью метода конечных элементов.

**Результаты исследования.** Было определено, что в процессе термообработки по режиму аустенизации остаточные сварочные напряжения в выгородке почти полностью релаксируют. За счет высокого градиента температур во время быстрого охлаждения на воздухе после нагрева в процессе аустенизации в зонах выгородки с наибольшей толщиной металла образуются новые достаточно высокие остаточные напряжения.

**Выводы.** По результатам исследования был определен высокий уровень остаточных технологических напряжений, которые следует учитывать при расчетном обосновании продления ресурса выгородки реактора ВВЭР-1000.

**Ключевые слова:** реактор ВВЭР-1000, внутрикорпусные устройства, выгородка, сварка, термообработка, аустенизация, остаточные напряжения, математическое моделирование.