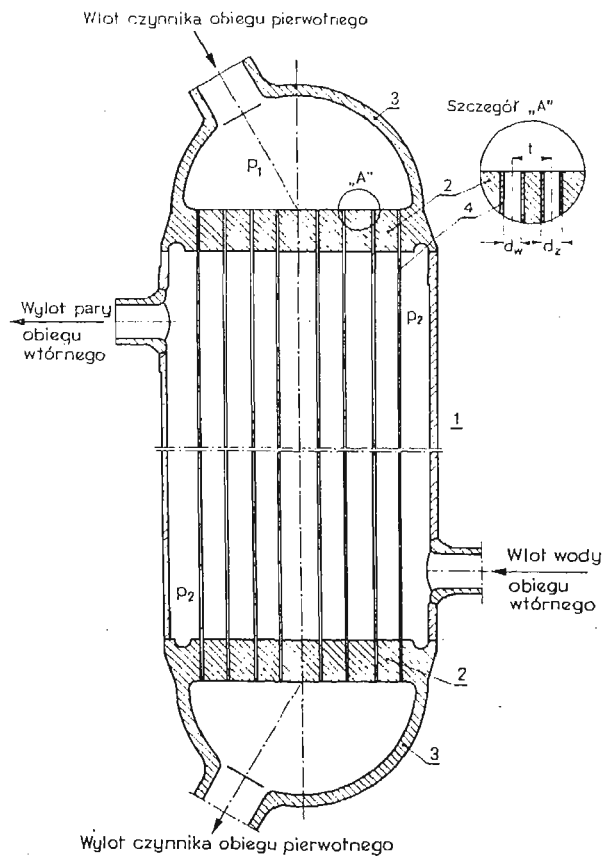


ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA PIONOWEJ PRZEPŁYWOWEJ WYTWORNICZY PARY ELEKTROWNI JĄDROWYCH

MICHAŁ NIEZGODZIŃSKI, WACŁAW ZWOLIŃSKI (ŁÓDŹ)

1. Wprowadzenie

Z pośród szeregu systemów i rozwiązań konstrukcyjnych wytwornic pary elektrowni jądrowych (wytwornice poziome, U-rurowe itp.) — szereg zalet wykazują przepływowe wytwornice pionowe o budowie podanej schematycznie na rys. 1. Wytwornica taka składa się z płaszcza cylindrycznego (1), do którego przyspawane są dna sitowe (2) z dennicami (3). Przestrzeń między dnami sitowymi wypełniają proste rurki (4), których końce są



Rys. 1. Schemat przepływowej wytwornicy pary 1 — płaszcz cylindryczny, 2 — dno sitowe, 3 — dennica półkulista, 4 — rurki wkładu grzewczego

rozwałcowane w dnach sitowych (lub w inny sposób np. wybuchowo — połączone z dnami).

Jeżeli rurki — na swej długości — usztywnione zostaną przeponami, to wówczas mogą przenosić nie tylko siły rozciągające, lecz również ściskające — a więc mogą być traktowane jak sprężyste podłoże na którym spoczywają dna sitowe. Przy tym rozwiązaniu dna sitowe mogą być traktowane jako kołowe płyty perforowane spoczywające na sprężystym podłożu. Analiza takiego zagadnienia przeprowadzona została przez autorów w pracach [1], [2] a ostatnio również analogiczne rozwiązanie ukazało się w opracowaniu [3].

Dotychczasowe opracowania oparte były na teorii płyt cienkich i z powodzeniem mogły być wykorzystane do analizy urządzeń niskociśnieniowych (wytwornice pary elektrowni konwencjonalnych, reaktory chemiczne itp.).

W odniesieniu do elektrowni jądrowych, gdzie ciśnienie obiegu pierwotnego wynosi przykładowo 20 MPa, przy ekonomicznie uzasadnionej średnicy wytwornicy pary rzędu $2 \div 4$ m (i wysokości rzędu 20 m) — grubość den sitowych wypada rzędu 0,6 m, a więc dna takie powinny być liczone według teorii płyt grubych.

Dla płyt takich — liczonych wg teorii płyt cienkich, a więc z pominięciem wpływu naprężeń od sił tnących na odkształcenia postaciowe elementów płyty — otrzymuje się ugięcia znacznie mniejsze od ugięć rzeczywistych, otrzymywanych po zastosowaniu teorii płyt grubych, co w zdecydowany sposób wpływa na ustalenie sił osiowych (ściskających lub rozciągających) działających na rurki wkładu grzewczego.

Opierając się na wynikach analiz teoretycznych i badań doświadczalnych [4] cienkie dna sitowe można było traktować jako perforowane płyty koliste, w których wpływ perforacji uwzględniany był przez zmianę stałych materiałowych. Jeżeli w płycie okrągłej o grubości g , wykonanej z materiału o modułach sprężystości E oraz G i liczbie Poissona ν wykonano gęstą sieć otworów, to obliczenia takiej płyty perforowanej można prowadzić jak dla płyty izotropowej pełnej wykonanej z materiału o takiej samej grubości lecz innych zastępczych stałych materiałowych E^* , G^* oraz ν^* .

Powyższy warunek izotropowości materiału płyty perforowanej, stosowany w odniesieniu do płyt cienkich, nie może być przyjęty w odniesieniu do płyt grubych. O ile bowiem w płaszczyźnie płyty gęsta sieć otworów może dawać w efekcie jednakowe w każdym kierunku stałe parametry odkształceń, to w kierunku poprzecznym stałe materiałowe muszą być inne, gdyż występują tu lite kolumny materiału rodzimego. Tak więc w odniesieniu do grubych płyt perforowanych stałe materiałowe powinny być inne w płaszczyźnie płyty, a inne w kierunku prostopadłym tj. wzdłuż grubości płyty. Wartości liczbowe stałych materiałowych E^* , G^* , ν^* w płaszczyźnie płyty oraz E^z , G^z , ν^z w kierunku prostopadłym do płaszczyzny płyty określić można na podstawie wykresu podanego na rysunku 2 (według [5]), w zależności od współczynnika perforacji η , który dla heksagonalnej siatki otworów wyraża się wzorem:

$$(1.1) \quad \eta = \frac{h + \kappa \cdot g_r}{t},$$

gdzie:

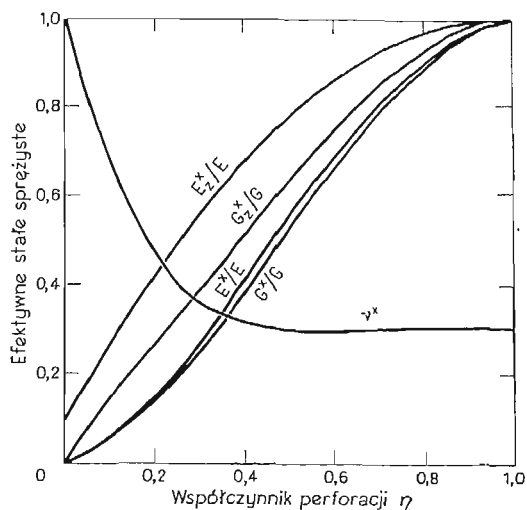
h — szerokość mostka w najwęższym przekroju

g_r — grubość ścianki rurki

t — podziałka perforacji (w układzie heksagonalnym)

$\kappa = 1,5 \div 2,0$ — współczynnik zależny od połączenia rurki z dnem sitowym (dla rurek rozwałcowywanych $\kappa = 1,5$, dla dokładnego połączenia np. metodą wybuchową $\kappa = 2,0$).

Biorąc pod uwagę przytoczone względy, analizę naprężeń w pionowej przepływowej wytwornicy pary elektrowni jądrowych przeprowadzono przy założeniu, że dna sitowe



Rys. 2. Zależność między stałymi materiałowymi dla grubych kolistych płyt perforowanych ($\nu = 0,3$)

traktowane są jako grube, perforowane, ortotropowe płyty kolisty spoczywające na sprężystym podłożu utworzonym z rurek wkładu grzewczego. Płyty te współpracują z płaszczem cylindrycznym oraz z przyspawanymi do nich półkulistymi dennicami.

2. Założenia do obliczeń

Na podstawie analizy warunków pracy wytwornicy przyjęto założenie że temperatury wszystkich rurek wkładu grzewczego są w każdym przekroju poprzecznym (poziomym) wytwornicy jednakowe (i zmieniają się wzdłuż długości rurek). Dzięki usztywniającemu działaniu przepon umożliwiającym przenoszenie przez rurki sił ściskających przyjęto, że rurki tworzą sprężyste podłoże typu winklerowskiego o stałej:

$$(2.1) \quad k = \psi_k \frac{n(d_z^2 - d_w^2)E_r}{4a^2 l_r}.$$

Oznaczenia w powyższym wzorze:

- l_r — połowa długości rurek (połowa prześwitu między dnami sitowymi)
- d_z, d_w — zewnętrzna i wewnętrzna średnica rurek (wszystkie rurki wkładu grzewczego są jednakowe)
- E_r — moduł Younga materiału rurek
- ψ_k — współczynnik uwzględniający niedokładność wykonania i odchyłki od prostoliniowości rurek

n — liczba rurek wkładu grzewczego

a — zewnętrzny obliczeniowy promień części perforowanej dna sitowego. Promień ten (wg [6] s. 431) oblicza się ze wzoru

$$a = r_o + \frac{d_z}{4}$$

gdzie: r_o — odległość osi najdalszego otworu od środka płyty.

Przeprowadzane badania doświadczalne [7] wykazały, że własności rzeczywistych rurek, przy ich osiowym ściskaniu wyraźnie różnią się od własności teoretycznych, wynikających z prawa Hooke'a jak również ze wzorów Eulera określających siłę krytyczną (wyboczeniową). Tak więc dla rurek inconelowych ϕ 16/14 mm przy smukłości około 100 współczynnik ten wynosi $\psi_k = 0,7$ do $0,4^{1)}$.

W odróżnieniu od den pełnych, dla których promieniowe odkształcenie dna od sił tarczowych traktuje się zazwyczaj jako pomijalne, w przypadku den perforowanych konieczne jest uwzględnienie również i tych odkształceń.

Mając na uwadze omówione wyżej względy, schemat obliczeniowy wytwornicy przyjęto w następujący sposób. W połowie wysokości wytwornicy poprowadzono umowną płaszczyznę symetrii (oznaczoną I-I na rys. 1) i obliczenia wykonano osobno dla górnej, a następnie — przy zastosowaniu takich samych wzorów — dla dolnej połówki. Założenie to związane jest z faktem, że dla uproszczenia wzorów — w niniejszym, opracowaniu pominięto wpływ ciężaru własnego, oddziaływania podpór i rurociągów, obciążeń sejsmicznych, niustalonych stanów pracy itp. gdyż powyższe czynniki można osobno obliczyć i uwzględnić stosując zasadę superpozycji. Tak więc każda połówka wytwornicy składa się z grubej, ortotropowej płyty kolistej spoczywającej na sprężystym podłożu utworzonym z rurek wkładu grzewczego, współpracującej z pierścieniem, do którego przyspawany jest płaszcz cylindryczny oraz półkulista dennica. Przyjęto, że pierścień ten może zmieniać swą średnicę lecz jest na tyle sztywny, że jego przekroje poprzeczne nie doznają odkształceń postaciowych (mogą się przemieszczać i obracać zachowując swój pierwotny kształt).

3. Podstawowe wzory i zależności wytrzymałościowe

Układ sił działających na każdy z głównych elementów wytwornicy przedstawiono na rys. 3, gdzie podano również wymiary i oznaczenia występujące w dalszej części opracowania. Wszystkie siły brzegowe odniesione są do jednostki długości mierzony po obwodzie określonym danym promieniem.

Na skutek działania ciśnienia p_1 obiegu pierwotnego i ciśnienia p_2 obiegu wtórnego, obliczeniowe ciśnienie działające na część perforowaną dna sitowego od strony górnej (wg rys. 3) wynosi:

$$(3.1) \quad p_{10} = p_1 \left[1 - n \left(\frac{d_w}{2a} \right)^2 \right],$$

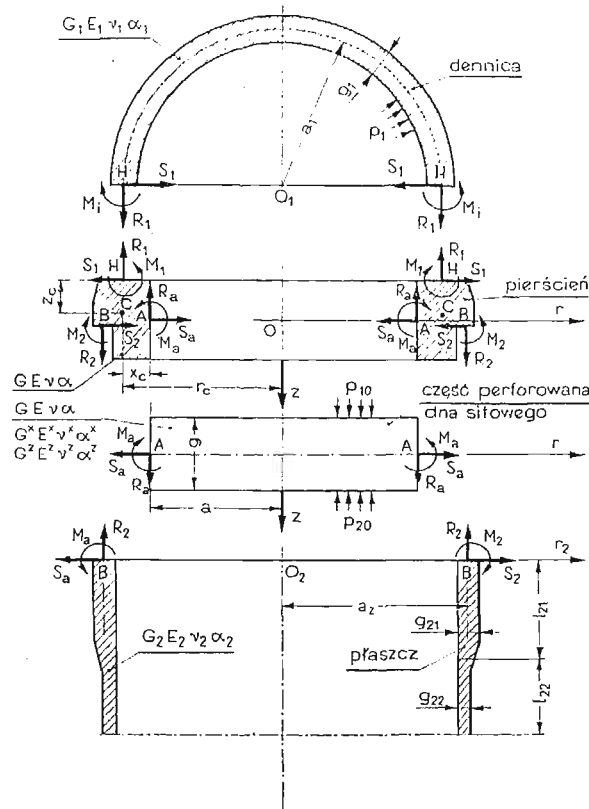
¹⁾ Badania przeprowadzone przez K. Januszkiewicza i J. Grabskiego [7].

zaś od strony dolnej:

$$(3.2) \quad p_{20} = p_2 \left[1 - n \left(\frac{d_z}{2a} \right)^2 \right].$$

Różnice swobodnych wydłużeń płaszcza i rurek wkładu grzewczego powodują powstanie sił brzegowych które wyznaczyć można z warunków ciągłości układu dla $r = a$. Swobodne wydłużenie rurek spowodowane przyrostem temperatury wyraża się związkiem:

$$(3.3) \quad \Delta l_r = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \alpha_{ri} \cdot l_{ri} \cdot \Delta t_{ri},$$



Rys. 3. Obciążenia głównych elementów wytwornicy pary.

podobnie swobodne wydłużenie termiczne płaszcza

$$(3.4) \quad l_p = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^m \alpha_{pl} \cdot l_{pl} \cdot \Delta t_{pl}.$$

Ponadto działanie ciśnienia wewnętrznego p_{10} i zewnętrznego p_{20} na rurki powoduje ich wydłużenie o wielkość:

$$(3.5) \quad \Delta l_{rp} = \frac{\nu_r \cdot l_r (p_1 - p_2) \cdot (d_z + d_w)}{2(d_z - d_w) E_r}.$$

W powyższych wzorach α_{ri} oraz α_{pi} oznacza współczynnik cieplnej rozszerzalności liniowej, l — długość strefy o danej średniej temperaturze zaś t — różnica temperatury pracy i montażu danej strefy, odpowiednio dla rurek (indeks r) lub płaszcza (indeks p), przy czym liczba „ i ” stref rurek wynosi k , zaś płaszcza — m . Po wprowadzeniu omówionych wyżej oznaczeń przemieszczenia punktu A (położonego na zewnętrznej krawędzi powierzchni środkowej części perforowanej dna sitowego, rys. 3), zgodnie ze wzorem (6.5) podanym w pracy [8] dla tego przypadku wynosi:

$$(3.6) \quad w_a = \frac{p_{10} + p_{20}}{k} + \Delta l_r - \Delta l_p + \Delta l_{rp} + C_1 \operatorname{Ber}(\beta a e^{i\alpha}) + C_2 \cdot \operatorname{Bei}(\beta a e^{i\alpha}),$$

w kierunku zaś promieniowym (wzór (6.6) w pracy [8]).

$$(3.7) \quad u_a = -\eta \{ C_1 [\operatorname{Ber}'(\beta a e^{i\alpha}) \cos 2\alpha + \operatorname{Bei}'(\beta a e^{i\alpha}) \sin 2\alpha] + \\ + C_2 [-\operatorname{Ber}'(\beta a e^{i\alpha}) \sin 2\alpha + \operatorname{Bei}'(\beta a e^{i\alpha}) \cos 2\alpha] + \beta a A_1 \} + \alpha \alpha_i \Delta t$$

kąt obrotu:

$$(3.8) \quad \Theta_a = -\frac{3k}{2\beta g G^z} \left\{ C_1 \left[\left(\cos 2\alpha + \frac{2\beta g G^z}{3k} \right) \operatorname{Ber}'(\beta a e^{i\alpha}) + \operatorname{Bei}'(\beta a e^{i\alpha}) \sin 2\alpha \right] + \right. \\ \left. + C_2 \left[\operatorname{Ber}'(\beta a e^{i\alpha}) \sin 2\alpha + \left(\cos 2\alpha + \frac{2\beta g G^z}{3k} \right) \operatorname{Bei}'(\beta a e^{i\alpha}) \right] \right\}$$

Oznaczenia w powyższych wzorach omówione są w pracy [8], tam też podane są zależności pozwalające wyznaczyć stałe C_1 , C_2 oraz A_1 w funkcji sił brzegowych M_a , S_a , R_a działających na część perforowaną dna sitowego.

Z warunku równowagi dennicy (górnej wg rys. 3) znajdujemy:

$$(3.9) \quad R_1 = p_1 \frac{\left(a_1 - \frac{1}{2} g_1 \right)^2}{2a_1},$$

promieniowe przemieszczenie brzegu dennicy (punkt H na rys. 3):

$$(3.10) \quad W_H = \frac{2\beta_1}{E g_1} (\beta_1 M_1 - a_1 S_1) + a_1 \alpha_1 t_1,$$

gdzie:

$$\beta_1 = \sqrt[4]{\frac{3(1-\nu^2)a_1^2}{g_1^2}}; \quad D_1 = \frac{E g_1^3}{12(1-\nu^2)} \\ \Theta_H = \frac{2\beta_1^2}{E g_1 a_1} (2\beta_1 \cdot M_1 - S_1)$$

Analogicznie dla krawędzi płaszcza (pkt B wg rys. 3, przy założeniu że najbliższy pierścienia odcinek powłoki walcowej można traktować, jako powłokę długą, $\beta_{21} \cdot l_{21} > > 3$).

$$(3.11) \quad w_B = \frac{1}{2\beta_{21}^3 \cdot D_{21}} (S_2 + \beta_{21} \cdot M_2) + \frac{a_2}{E g_{21}} (p_2 \cdot a_2 - \nu \cdot R_2) + a_2 \cdot \alpha_2 \cdot \Delta t_{21},$$

$$(3.12) \quad \Theta_B = -\frac{1}{2\beta_{21}^2 \cdot D_{21}} (S_2 + 2\beta_{21} \cdot M_2),$$

gdzie:

$$\beta_{21} = \sqrt[4]{\frac{3(1-\nu^2)}{a_2^2 \cdot g_{21}^2}}; \quad D_{21} = \frac{E g_{21}^3}{12(1-\nu^2)}$$

Dla uproszczenia rozważań — pominięto różnicę temperatur na grubości dennicy, powłoki walcowej i pierścienia wytwornicy.

Dalsze równania wynikające z warunków równowagi pierścienia oraz warunki ciągłości odkształceń dla punktów *A*, *H* oraz *B* pierścienia i przylegających elementów pozwalają wyznaczyć wszystkie występujące tu siły wewnętrzne (brzegowe) a następnie naprężenia w poszczególnych elementach wytwornicy pary.

Literatura cytowana w tekście

1. M. E. NIEZGODZIŃSKI, W. ZWOLIŃSKI, *Obliczenia wytrzymałościowe przepływowych wytwornic pary z uwzględnieniem podatności rur wkładu grzewczego*, Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Mechanika z. 40, 1974 r.
2. M. E. NIEZGODZIŃSKI, W. ZWOLIŃSKI, *Praktyczna metoda obliczeń wytrzymałościowych wymienników ciepła z dnami sitowymi spoczywającymi na sprężystym podłożu*, Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Mechanika z. 45, 1976 r.
3. K. P. SINGH, *Analysis of vertically mounted through — tube heat exchangers*, Transactions of ASME, vol. 100 April 1978.
4. M. E. NIEZGODZIŃSKI, *Obliczenie den w zbiornikach ciśnieniowych*, Przegląd Mechaniczny Nr. 18, 1977 r.
5. T. SLOT, *Ortotropic Analysis of Thick Perforated Plate With Pressure on one Side*, Second International Conference on Structural Mechanics in Reaktor Technology. Berlin 10 - 14.09.1973, vol. F 6/8.
6. American Society of Mechanical Engineers (ASME), *Boiler and Pressure Vessel Code — Section III, Nuclear Power — Plant Components*, New York 1974.
7. M. E. NIEZGODZIŃSKI i inni, *Metoda przeprowadzania obliczeń wytrzymałościowych przepływowych wytwornic pary elektrowni jądrowych*, Praca niepublikowana, wykonana w Instytucie Mechaniki Stosowanej P.Ł., 1975 r.
8. W. ZWOLIŃSKI, *Płyta kołowa gruba o ortotropii cylindrycznej, spoczywająca na sprężystym podłożu*. (MTiS).

Р е з ю м е

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ.

В работе представлен аналитический метод определения внутренних сил и напряжений в основных элементах вертикальных парогенераторов. Положено, что трубы обогревающего вкладыша создают упругое основание, на котором опираются трубные доски. Перфорированные днища рассчитаны как толстые, ортотропные плиты.

Решение получено из уравнений совместности деформаций и равновесия внутренних сил — элементов входящих в узел соединения днища, сферической и цилиндрической оболочки.

S u m m a r y

STRENGTH ANALYSIS OF THE VERTICAL FLOW STEAM GENERATORS OF NUCLEAR POWER PLANTS

An analytical method is considered of calculation of internal stresses and forces in the main elements of the vertical flow steam generators of nuclear power plants. The heating tubes make an elastic foundation supporting the perforated bottoms. The bottoms are assumed to be orthotropic plates joined with a cylindrical shell and hemispherical or elliptical heads. The solutions are given for any conditions of exploitation.

POLITECHNIKA ŁÓDZKA

Praca została złożona w Redakcji dnia 12 stycznia 1979 roku.
