

Національна академія наук України
Міністерство енергетики України
Інститут теплоенергетичних технологій НАН України
Громадська рада при Міністерстві енергетики України
НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ТОВ DELTIMA



XVIII Міжнародна науково-практична конференція

**ТЕПЛОВА ЕНЕРГЕТИКА:
ШЛЯХИ РЕНОВАЦІЇ ТА РОЗВИТКУ**

Київ 2022

**Національна академія наук України
Міністерство енергетики України
Інститут теплоенергетичних технологій НАН України
Громадська рада при Міністерстві енергетики України
НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ТОВ DELTIMA**

**ТЕПЛОВА ЕНЕРГЕТИКА:
ШЛЯХИ РЕНОВАЦІЇ ТА РОЗВИТКУ**

XVIII Міжнародна науково-практична конференція

ЗБІРКА НАУКОВИХ ПРАЦЬ

Київ 2022

ЗБІРКА НАУКОВИХ ПРАЦЬ
XVIII Міжнародна науково-практична конференція

**«ТЕПЛОВА ЕНЕРГЕТИКА:
ШЛЯХИ РЕНОВАЦІЇ ТА РОЗВИТКУ»**

2022 р.

Національна академія наук України
Міністерство енергетики України
Інститут теплоенергетичних технологій НАН України
Громадська рада при Міністерстві енергетики України
НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ТОВ DELTIMA

Затверджено до друку Вченою радою
Інститут теплоенергетичних технологій НАН України

Рецензенти:

О. Ю. Черноусенко, доктор технічних наук, професор

К. Є. П'яних, доктор технічних наук

УДК 621.78.012-37.091.12:005745

ISBN 978-617-7852-33-8

DOI 10.48126/conf2022

Підписано до друку: 11.10.2022
Формат: 60x90/16. Папір офсетний.
Умов. друк. арк. 8,25.
Друк цифровий. Наклад 60 прим.
Замовлення: 3648
Надруковано: ТОВ «Гнозіс»

Energy Equipments. Studies in Systems, Decision and Control, 281, 91–133, Springer, Cham.

4. Мислович М. В., Моделі форм представлення навчаючих сукупностей для багаторівневих систем діагностування вузлів електротехнічного обладнання. Технічна електродинаміка. 2021.

УДК 664.1.048

MODELING OF HEAT TRANSFER IN DOWN FLOWING ANNULAR VAPOR-LIQUID FLOWS

Petrenko V., ScD, Assoc. Prof.; Pryadko M, ScD, Prof.;
Ryabchuk O, PhD, Assoc. Prof.; Boyko V., PhD, Assoc. Prof.
National University of Food Technologies

Introduction. Most of the proposed algebraic models of turbulent viscosity for film flows only approximate the real distribution of turbulence in the cross section of the film according to published experimental data. The existing models have a discrete layered structure, and the solutions of the heat and momentum conservation equations using these ratios are only numerical. An improved model of turbulent viscosity is proposed, and based on it, an analysis of thermohydrodynamic processes in liquid films during vaporization is carried out.

Materials and methods. Physical modeling was performed in pipes: $d = 22 \times 1 \text{ mm}$, $L = 1,8 \text{ m}$, and $d = 33 \times 1,5 \text{ mm}$, $L = 9 \text{ m}$. The bulk density of irrigation varied in the range of $0,05 \dots 0,55 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ in the pipe $d = 20 \text{ mm}$, and $0,05 \dots 1,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ in the pipe $d = 30 \text{ mm}$. Model liquids – water and sugar solutions with a concentration of up to 70% at atmospheric pressure and a vacuum of up to 0,86 bar. Heating was carried out with dry saturated steam.

Results and Discussion. In engineering calculations, the integral characteristics of heat transfer in films during vaporization are often determined through the time-averaged characteristics of the film, in the form

$$q = -\left(\frac{\lambda}{\delta}\right) \left(1 + \frac{\text{Pr} \ v_t}{\text{Pr}_t \ v}\right) \frac{dt}{d\eta}, \quad (1)$$

where q – heat flux; λ – heat conduction of liquid; $\eta = y/d$ – dimensionless transverse coordinates; t – temperature; d – film thickness; y – normal to the heat surface coordinate; v_t, v – turbulent and molecular cinematic viscosity coefficient, respectively; Pr_t, Pr – turbulent and molecular Prandtl number, respectively.

The main condition for the correct application of (1) is the adequacy of the turbulent viscosity model. A characteristic feature of film flows is the presence of a zone of suppression of turbulence by the interphase surface of the film. Measurement data of velocity pulsations indicate a rapid attenuation of turbulence within the interphase surface [1], while in the wall region the shape of the turbulent viscosity curve corresponds to a single-phase flow, Fig. 1.

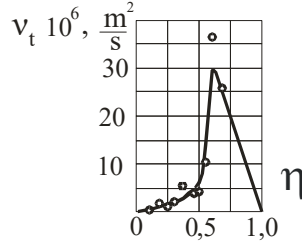


Fig. 1. Dependence of turbulent viscosity on the thickness of the water film ($t = 20^\circ\text{C}$), when flowing down a vertical surface [2] $Re = 1310$, (method of stroboscopy of aluminum oxide microparticles).

Most of the published algebraic models of turbulent viscosity for film flows are given in [2], but none of them correspond to the real distribution of turbulence in the cross section of the film, Fig. 1. To model turbulence and, accordingly, transfer processes in a vertically flowing film, consider the expression

$$\frac{v_t}{v} = \varepsilon \eta^2 (1 - \eta^2), \quad (2)$$

where ε is the maximum value of the turbulence function at the top of the side-shifted interphase surface of the parabola, which qualitatively reproduces the curve in Fig. 1. Taking $Pr_t = 1$ under the boundary conditions $h = 0$, $t = t_w$ from (1, 2), we obtain the temperature profile in the film

$$t = t_w - \frac{q\delta}{\lambda} \frac{\sqrt{2}H}{(4 + \varepsilon Pr)} \left[\frac{1}{R} \text{Arth} \left(\frac{\sqrt{2\varepsilon Pr}}{R} \eta \right) - \frac{1}{A} \text{Arth} \left(\frac{\sqrt{2\varepsilon Pr}}{A} \eta \right) \right], \quad (3)$$

and from (3), under the condition $h=1$, $t = t_i$, the temperature on the interfacial surface t_i

$$t_i = t_w - \frac{q\delta}{\lambda} \frac{\sqrt{2}H}{(4 + \varepsilon Pr)} \left[\frac{1}{R} \text{Arth} \left(\frac{\sqrt{2\varepsilon Pr}}{R} \right) - \frac{1}{A} \text{Arth} \left(\frac{\sqrt{2\varepsilon Pr}}{A} \right) \right],$$

where $H = \sqrt{4\varepsilon Pr + \varepsilon^2 Pr^2}$; $A = \sqrt{\varepsilon^2 Pr^2 - \varepsilon Pr H}$; $R = \sqrt{\varepsilon^2 Pr^2 + \varepsilon Pr H}$; t_w – pipe wall temperature.

Expressing the heat transfer coefficient as $\alpha = \frac{q}{t_w - t_i}$, we get

$$\alpha = \frac{\lambda}{\delta} \frac{(4 + \varepsilon \text{Pr})}{\sqrt{2}H \left[\frac{1}{R} \text{Arth} \left(\frac{\sqrt{2\varepsilon \text{Pr}}}{R} \right) - \frac{1}{A} \text{Arth} \left(\frac{\sqrt{2\varepsilon \text{Pr}}}{A} \right) \right]} \quad (4)$$

The film thickness d is present in expression (4), which is determined from the equation of motion

$$\frac{\tau_i \delta}{\rho v} + \frac{g \delta^2}{v} (1 - \eta) = \left[1 + \varepsilon (\eta^2 - \eta^4) \right] \frac{du}{d\eta}, \quad (5)$$

where t_i – shear stress on the film interface; u – velocity; r – density of liquid.

From (5) under the boundary conditions $h = 0, u = 0$, we get

$$u = \left(\frac{\tau_i \delta}{\rho v} + \frac{g \delta^2}{v} \right) \frac{\sqrt{2}h}{(4 + \varepsilon)} \left[\frac{1}{r} \text{Arth} \left(\frac{\sqrt{2\varepsilon}}{r} \eta \right) - \frac{1}{a} \text{Arth} \left(\frac{\sqrt{2\varepsilon}}{a} \eta \right) \right] - \frac{g \delta^2}{v h} \left[\text{Arth} \left(\frac{\varepsilon (2\eta^2 - 1)}{h} \right) + \text{Arth} \left(\frac{\varepsilon}{h} \right) \right],$$

$$\text{where } h = \sqrt{4\varepsilon + \varepsilon^2}; \quad a = \sqrt{\varepsilon^2 - \varepsilon h}; \quad r = \sqrt{\varepsilon^2 + \varepsilon h}; \quad n = \left[\frac{1}{r} \text{Arth} \left(\frac{\sqrt{2\varepsilon}}{r} \right) - \frac{1}{a} \text{Arth} \left(\frac{\sqrt{2\varepsilon}}{a} \right) \right].$$

Accordingly, the average speed u_{av}

$$u_{av} = \left(\frac{\tau_i \delta}{\rho v} + \frac{g \delta^2}{v} \right) \frac{\sqrt{2}h}{(4 + \varepsilon)} \left[n - \frac{\sqrt{2}}{4\varepsilon} \ln \left(\frac{a^2 - 2\varepsilon^2}{r^2 - 2\varepsilon^2} \right) - \frac{\sqrt{2}}{2\varepsilon} \ln \left(\frac{r}{a} \right) \right] - \frac{g \delta^2}{v h} \left[2 \text{Arth} \left(\frac{\varepsilon}{h} \right) - \frac{\sqrt{2}h}{2} \left(\frac{1}{r} \text{Arth} \left(\frac{\sqrt{2\varepsilon}}{r} \right) + \frac{1}{a} \text{Arth} \left(\frac{\sqrt{2\varepsilon}}{a} \right) \right) - \frac{\sqrt{2\varepsilon}}{2} n \right].$$

Given that $d = \Gamma_v / u_{av}$, the expression for finding the average thickness of the film takes the form

$$\Gamma_v = \left(\frac{\tau_i \delta^2}{\rho v} \right) D + \frac{g \delta^3}{v h} (D h - B), \quad (6)$$

where $B = \left[2 \text{Arth} \left(\frac{\varepsilon}{h} \right) - \frac{\sqrt{2}h}{2} \left(\frac{1}{r} \text{Arth} \left(\frac{\sqrt{2\varepsilon}}{r} \right) + \frac{1}{a} \text{Arth} \left(\frac{\sqrt{2\varepsilon}}{a} \right) \right) - \frac{\sqrt{2\varepsilon}}{2} n \right]$, Γ_v – volumetric liquid

flux, m^2/s ; $D = \frac{\sqrt{2}h}{(4 + \varepsilon)} \left[n - \frac{\sqrt{2}}{4\varepsilon} \ln \left(\frac{a^2 - 2\varepsilon^2}{r^2 - 2\varepsilon^2} \right) - \frac{\sqrt{2}}{2\varepsilon} \ln \left(\frac{r}{a} \right) \right]$.

The function e was found by comparing experimental and calculated values of heat transfer coefficients in the mode of evaporation from the interphase surface using (4). For water and sugar solutions during vaporization in pipes of different diameters, an expression for the e was obtained

$$\varepsilon = 5 \cdot 10^{-5} \text{Re}^{1.4} \left\{ 1 + 3,6 \left[1 - \exp \left(1 - \frac{d}{d_o} \right) \right] \right\}, \quad (7)$$

where d is the diameter of the pipe; $d_o = 0,02 \text{ m}$.

Graphical interpretation of the results of calculations according to (4, 7) for freely flowing films of water in the mode of evaporation from the interphase surface

in pipes of different diameters and comparison with experimental data are shown in Fig. 2.

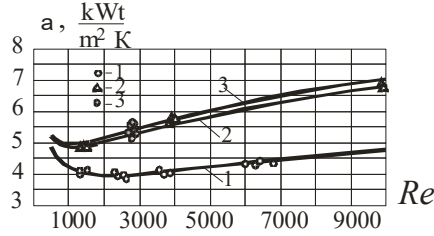


Fig. 2. Dependence of $a = f(Re)$ for pipes of different diameters: 1 – data of the authors, $d = 20$ mm; 2 – $d = 30$ mm; 3 – , $d = 32$ mm, water, $t = 100$ °C.

In the presence of vapor velocity above the surface of the film, its thickness as well as the amplitude of the waves decreases, which leads to suppression of turbulence. Comparing experimental data on heat transfer to liquid films in the presence of interfacial shear stress with calculated data, we obtain an expression for the function of suppressing turbulence in the film by the vapor flow f_u in the region $We < 250$

$$f_u = S \left[1 - 0,1 \exp(-1,1086 \sqrt{We}) \right], \quad (8)$$

where

$$S = 1,119 - 0,122 \sqrt{We} + \left(0,07424 + \frac{Re}{9,153 \cdot 10^6} \right) (\sqrt{We})^2 - 0,01808 (\sqrt{We})^3 + 1,775 \cdot 10^{-3} (\sqrt{We})^4 - 7,8 \cdot 10^{-5} (\sqrt{We})^5 + 1,28 \cdot 10^{-6} (\sqrt{We})^6,$$

$We = \frac{\rho_2 u_2^2 d_o}{\sigma}$ – the Weber number; u_2 , r_2 – velocity and vapor density, respectively; σ – surface tension. The graphic interpretation of (8) is shown in Fig. 4.

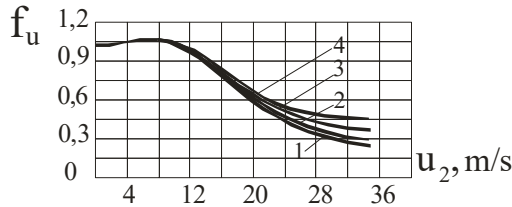


Fig. 3. Dependence of $f_u = f(u_2)$ at atmospheric pressure: 1 – $Re = 1000$, 2 – 3000 , 3 – 6000 , 4 – 9000 .

In the end, the algebraic function of the distribution of turbulent viscosity in falling films with accompanying vapor flow in the range $We < 250$, $\Gamma_v < 0.6 \cdot 10^{-3}$ m²/s for pipes with diameters from 20 to 32 mm (the investigated range) takes the form

$$\frac{v_t}{v} = 5 \cdot 10^{-5} Re^{1,4} \left\{ 1 + 3,6 \left[1 - \exp \left(1 - \frac{d}{d_o} \right) \right] \right\} f_u \eta^2 (1 - \eta^2) \quad (9)$$

Graphical interpretation of (9) for different phase costs is shown in Fig. 4

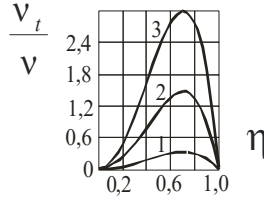


Fig. 4 Dependence $\frac{v_t}{v} = f(\eta)$ according to relation (9) for water at $t = 100\text{ }^\circ\text{C}$, $d = 0,02\text{ m}$, $u_2 = 10\text{ m/s}$, 1 – $Re = 1356$; 2 – 4068 ; 3 – 6780 .

The results of comparing the calculated values of heat transfer intensity for films of water and sugar solutions during vaporization with experimental data are shown in Fig. 5.

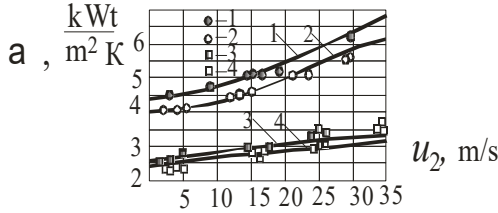


Fig. 5. Dependence $a=f(u_2)$ for water and sugar solutions for a pipe, $d = 20\text{ mm}$; 1,2 – water, $t = 100\text{ }^\circ\text{C}$, 1 – $\Gamma_v = 0.5 \cdot 10^{-3}\text{ m}^2/\text{s}$, 2 – $0.3 \cdot 10^{-3}$, $Pr = 1.79$; 3,4 – sugar solution, $t = 100\text{ }^\circ\text{C}$, $DM = 40\%$, $Pr = 5.58$. Lines – calculation according to (3, 5, 8)

Conclusions

1. An algebraic model of turbulent viscosity is proposed, which qualitatively reproduces the real distribution of turbulent viscosity over the entire thickness of the film flowing down the vertical surface.
2. Based on the proposed model, analytical expressions for temperature and velocity profiles in the film and the corresponding integral thermohydrodynamic characteristics for both free flow and motion with a concomitant flow of steam (gas) are obtained.

REFERENCES

1. Ganchev B.G., Kozlov V.M. (1973), *Experimental study of the hydrodynamic structure of a liquid film under free flow on a vertical surface*, Theoretical foundations of chemical technology, 7, pp. 727 – 732.
2. Nikhin Mascarenhas, Issam Mudawar. (2013) *Investigation of eddy diffusivity and heat transfer coefficient for free-falling turbulent subjected to sensibl heating*, Int.J.Heat Mass Transfer, v.60, pp. 647 – 660.

ЗМІСТ

ВСТУПНЕ СЛОВО Дунаєвська Н. І.	3
МЕТОД РОЗРАХУНКУ ДИНАМІКИ ЗМІНИ УСЕРЕДНЕНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ТА КОНЦЕНТРАЦІЇ ЗАРЯДІВ В ЕЛЕМЕНТАХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРИСТРОЇВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ ЕЛЕКТРОЛІТИ Кучинський В. П., Матях С. В., Резцов В. Ф., Суржик Т. В.	4
СПАЛЮВАННЯ МЕТАНУ У ЗАВИХРЕНОМУ ПОТОЦІ З РЕЦИРКУЛЯЦІЄЮ ДИМОВИХ ГАЗІВ У ДУТТІВЕ ПОВІТРЯ Кобзар С. Г., Халатов А. А., Гапонич Л. С.	7
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВНИХ ПЕЛЕТ В ВОДОГРІЙНОМУ КОТЛІ Воробйов М. В., Баранюк О. В.	12
РОЗРАХУНКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ НАЙБІЛЬШ ЕКОНОМІЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТЕЦ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ Мірошниченко Є. С., Чернявський М. В.	17
PECULIARITIES OF REPAIRING OF A WEARED PRESS TOOL FROM STEEL 3H3M3F WITH USING OF THE MECHANIZED WELDING BY SELF-SHIELDING FLUX-CORED WIRE Pashynska E. G., Boyko I. O.	22
ОСОБЛИВОСТІ АВТОМАТИЧНОГО ЗВАРЮВАННЯ ПІД ФЛЮСОМ ТОВСТОСТІННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ОБЕРТАННЯ З МАРТЕНСИТНОЇ ХРОМИСТОЇ ТЕПЛОСТІЙКОЇ СТАЛІ СТОСОВНО РОТОРНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПАРОВИХ ТУРБІН НОВОГО ПОКОЛІННЯ Скульський В. Ю., Моравецький С. І., Царюк А. К., Німко М. О., Гаврик А. Р., Осипенко І. Г., Берднікова О. М., Алексеєнко Т. М.	25
ВИСОКОМАНЕВРЕНІ КОГЕНЕРАЦІЙНІ КОМПЛЕКСИ ЯК НАПРЯМ ПІДВИЩЕННЯ ГНУЧКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ Тесленко О. І.	33
CFD-МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОТИ КОТЛА ДКВР-10-13 ПРИ ДОДАВАННІ ВОДНЮ ДО ПРИРОДНОГО ГАЗУ Воробйов М. В., Баранюк О. В., Рябцун Р. С.	38
ВПЛИВ ЗМІН ТЕМПЕРАТУРИ ПОВІТРЯ ТА КІЛЬКОСТІ ОПАДІВ НА ВИРОБЛЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ГЕС В УКРАЇНІ Джигун О. М.	43
НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ СУПРОВІД ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОБОТИ ТРИПІЛЬСЬКОЇ ТЕС З ВИКОРИСТАННЯМ НЕПРОЕКТНИХ ПАЛИВ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ Чернявський М. В., Провалов О. Ю., Косячков О. В.	48

ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ З МАЛОВИТРАТНОГО ПЕРЕВЕДЕННЯ АНТРАЦИТОВИХ КОТЛОАГРЕГАТИВ ТП-15, ТП-47 ТЕЦ ТОВ “ЄВРО-РЕКОНСТРУКЦІЯ” НА СПАЛЮВАННЯ ГАЗОВОГО ВУГІЛЛЯ Чернявський М. В., Мірошніченко Є. С., Провалов О. Ю.	55
ЗНИЖЕННЯ ВИКИДІВ NOX ПРИ РОЗПОДІЛЕННІ ТЕПЛООВОГО НАВАНТАЖЕННЯ ПО ВИСОТІ ТОПКИ КОТЛА Логвинюк М. О., Новаківський Є. В.	60
ЗВАРЮВАННЯ-ПАЯННЯ ПІД ТИСКОМ Т-ПОДІБНИХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ТОНКОСТІННИХ ТРУБ ТА ТРУБ ІЗ ФЛАНЦЯМИ І ТРУБНИМИ ДОШКАМИ Прокоф'єв О. С., Римар С. В., Губатюк Р. С., Сорока Б. С., Сенчишин В. С.	65
ГРАНИЧНІ РЕЖИМИ ЖАЛЮЗІЙНИХ СЕПАРАЦІЙНИХ ПРИСТРОЇВ Туз В. О., Лебедь Н. Л., Кулеш Н. С.	68
ОКРЕМІ ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО КОРЕГУВАННЯ КОНЦЕПЦІЇ ЗНЯТТЯ З ЕКСПЛУАТАЦІЇ АЕС Філатов В. І., Бойко Н. Г.	72
УТОЧНЕННЯ МЕТОДИКИ ТЕПЛООВОГО РОЗРАХУНКУ ШИРМОВОГО ПАРОПЕРЕГРІВАЧА Туз В. О., Лебедь Н. Л., Дудченко А. О.	76
ЗАСТОСУВАННЯ КОНДЕНСАЦІЙНИХ ЕКОНОМАЙЗЕРІВ НА ГАЗОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТА ПРОМИСЛОВИХ КОТЛАХ Новаківський Є. В., Неділько А. В.	80
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУМІСНОГО СПАЛЮВАННЯ ВУГІЛЛЯ З RDF В КОТЛОАГРЕГАТІ ТПП-312 Кобзар С. Г., Топал О. І., Гапонич Л. С., Голенко І. Л.	84
ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ФАНКОЙЛА В РІЗНИХ РЕЖИМАХ ТЕПЛООБМІНУ Зур'ян О. В., Олійніченко В. Г.	91
МЕТОДОЛОГІЯ ЕКОНОМІКИ ЗАМКНЕНОГО ЦИКЛУ ТА УТИЛІЗАЦІЯ ВІДХОДІВ В ЕНЕРГЕТИЦІ Новосельцев О. В., Євтухова Т. О., Чуприна Л. В.	96
ПРОЦЕСИ КОНВЕРСІЇ ВІДХОДІВ БІОМАСИ ТА ПЛАСТИКУ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ ЗБАГАЧЕНОГО ВОДНЕМ СИНТЕЗ-ГАЗУ Дудник О. М., Соколовська І. С.	100
ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ БАГАТОРІВНЕВИХ ІНФОРМАЦІЙНО- ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ВІБРОДІАГНОСТИКИ ОБЕРТОВИХ ВУЗЛІВ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ВУГІЛЬНИХ ТЕС і ТЕЦ Гижко Ю. І., Зварич В. М., Кузик Г. А., Мислович М. В., Остапчук Л. Б.	103
MODELING OF HEAT TRANSFER IN DOWN FLOWING ANNULAR VAPOR-LIQUID FLOWS Petrenko V., Pryadko M, Ryabchuk O, Boyko V.	108