



Investigation of heat transfer enhancement on macro-, micro- and nanoscales Исследование интенсификации теплообмена на макро-, микро- и наномасшатабах



Kuzma-Kichta Yu.A. National Research University "Moscow Power Engineering Institute" Topics

-increase of critical heat flux,

-boiling on a surface with microporous coating,

-boiling of aqueous solutions,

-nanofluid boiling,

- contact angle and level rise of a liquid

- application

Темы:

- повышение критической тепловой нагрузки,
- кипение на поверхности с микропористым покрытием,
- кипение водных растворов,
- кипение наножидкости,
- краевой угол и высота подъема жидкости,
- применение



Books on boiling heat transfer enhancement on macro-, micro- and nanoscales Книги по интенсификации теплообмена на макро-, микро- и наномасштабах

А.С.Седлов, Ю.А.Кузма-Кичта ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН при кипении водных растворов ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ МЭИ

Sedlov A.S., Kuzma-Kichta Y.A. Hydrodynamics and heat transfer at boiling of water solutions. Publishing Haus MEI. 2007.P.168. Leontiev, I. Fedik, L. Kholpanov INTENSIFICATION of HEAT and MASS TRANSFER on MACRO-, MICRO-, and NAJOSCALES

B. Dzyubenko, Y. Kuzma-Kichta, A.

Dzybenko B.V., Kuzma-Kichta Y.A., Leontiev A.I., Fedik I.I., Kholpanov L.P. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах Begell Haus. 2016.P.564.

begell

Books on boiling heat transfer enhancement on micro- and nanoscales Книги по интенсификации теплообмена на макро-, микро- и наномасштабах





Dzybenko B.V., Kuzma-Kichta Y.A., Leontiev A.I., Fedik I.I., Kholpanov L.P. Heat-and mass transfer enhancement on macro-, micro- and nanoscales Moscow. ZNIIATOMINFORM.2008. C.532



Our books on boiling heat transfer enhancement on micro- and nanoscales Наши книги по интенсификации теплообмена на макро-, микро- и наномасштабах



Heat and Mass Transfer Enhancement on Macro-, Micro-, and Nanoscales Yu. Kuzma-Kichta & A. Leontiev, том 25, выпуск 6, 2018 Choice and Justification of the Heat Transfer Intensification Methods Yu. Kuzma-Kichta & A. Leontiev, Volume 25, Issue 6, 2018



Investigation method of interface oscillations under film doiling Методика исследования колебаний границы раздела фаз при пленочном кипении







сечение Пуанкаре гиперсферой $\Delta p = 0$ ческйи

Кипение – хаотический процесс



Mechanism of heat transfer enhancement at film boiling on surface with low conductivity coating investigated by laser diagnostic (method of "broad beam")

Механизм увеличения теплоотдачи при пленочном кипении на поверхности с малотеплопроводным покрытием исследован с помощью лазерной диагностики (метод "широкого пучка")



Low conductivity coating weakens large interface oscillations Малотеплопроводное покрытие ослабляет крупномасштабные колебания границы раздела раздела фаз

Разработка лазерной диагностики в отделе теплообмена ИВТ АН СССР



Профессор Б.С.Петухов, Чл.-корр. РАН, заведующий отделом теплообмена ИВТ АН СССР





Учитель (проф. С.А. Ковалёв) и его ученик родились под знаком Зодиака –Дева 10 сентября с

интервалом 12 лет

Профессор Кузма-Кичта Ю.А и его дипломник В.Г. Бондур разработали лазерную диагностику колзебаний границы раздела фаз при пленочном кипении. В дальнейшем Бондур В.Г. использовал её для изучения колебаний поверхности моря и и был выбран сначала академиком РАН и недавно вице-президен Origin of steam bubbles on surface with artificial cavities Образование паровых пузырей на поверхности с искусственными впадинами



Influence of surface structure on sodium pool boiling heat transfer: reentrant cavities (1), welds (2), smooth surface (3) Влияние пористого покрытия на теплоотдачу при кипении натрия в большом объеме







M. Shoji, 2001

(a) Conical, D=100 μ m (b) Cylindrical, D=100 μ m (c) Reentrant, D=100 μ m



(d) Conical, D=50 μ m

(e) Cylindrical, D=50 μ m



Я

On surface with reentrant cavities and cavities of cilindrical form the boiling begins at less temperature differences На поверхности с резервуарными впадинами и впадинами цилиндрической формы кипение начинается при меньших температурных напорах

Departure bubble diameters at water boiling in case of artificial and natural nucleation sites

S. Afonin, Yu. Kuzma-Kichta, 2010

Отрывные диаметры пузырей при кипении воды в случае с искусственными и естественными центрами парообразования



Дип/Децп

Hole diameter: $1 - 100 \mu$; $2 - 200 \mu$; $3 - 10 \mu$ [Shoji, 2004]; $4 - 50 \mu$ [Shoji, 2003]; 5 - natural nucleation sites [Kuzma-Kichta, 1997], $D_{n.c} \sim 1 \mu$

 D_0 – departure bubble's diameter, Da.c./Dn.c – ratio of diameters of artificial and natural holes. Water, q=28 kW/m²

Departure diameter of bubble decreases as the diameter of artificial cavity decreases

Отрывной диаметр пузыря уменьшается по мере уменьшения диаметра искусственной впадины



Boiling on surface with microscale structure Кипение на поверхности с микропористой структурой



Bubble growth in a re-entrant hole, Marto, 1956



Influence of surface structure on sodium pool boiling



Sintered microporous coating for boiling, Martin, 1970



Influence of copper micro porous sintered coating on water boiling heat transfer



Surface with micropins, Mitrovich, 2000



Temperature difference at which the boiling begins on surface with microporous coating:

Разность температур, при которой начинается кипение на поверхности с

микропористым покрытием

$$\Delta T_{NB} = \sqrt{\frac{4\sigma T_s \dot{q}_{NB} \left(1 + \text{Re } 10^{-5}\right)^{5.1}}{\rho'' r \lambda_{ef}}} \qquad (1)$$



Electron raster photograph of surface with microporous coating

$$\lambda_{ef} = \lambda_{CM} \gamma + \left(1 - \gamma\right) \left(\frac{1 - \varepsilon}{\lambda_{CM}} + \frac{\varepsilon'}{\lambda'} + \frac{\varepsilon''}{\lambda''}\right)^{-1}, \quad \gamma = \left(1 - \varepsilon^{\frac{1}{3}}\right)^{2}$$

with $0 \le \text{Re} \le 4.5 \times 10^4$.

The value ΔT_{NB} is reduced with decreasing flow rate and increasing effective thermal conductivity λ_{ef} . The nucleation site density at boiling on a surface with a micro porous sintered coating increases and can be described by the following quantity:

$$N \approx \left(\frac{D_{\max}}{D_{cr}}\right)^m = \left(\frac{D_{\max} r \rho'' \Delta T}{4\sigma T_s}\right)^m$$

where value m is defined by angle slope of a boiling curve, D_{max} -maximal pore diameter in coating

$$m = a\delta_{PC} / \lambda_{ef} + b$$
 , $b = 4$, $a = -16,3*10^3 \,(\text{W/m}^2 \,\text{K})$

Dmax is assumed to be equal to the particle diameter.



Calculation of boiling heat transfer on surface with microporous coating Расчет теплоотдачи при кипении на поверхности с микропористым покрытием Киzma-Kichta, 1987

According to model Labunzov D.A. (Thermal Engeniering, 1972, $N_{2}9$) boiling heat transfer is determined by thermal conductivity transfer through microliquid film, which thickness is time-averaged for the whole heated surface



$$\alpha_{PC} = K \left(\frac{(\lambda')^2}{\upsilon' r \rho'' \delta_{PC}} \right)^{\frac{1}{2+m}} \left(\frac{D_{\max} r \rho''}{4\sigma T_s} \right)^{\frac{m}{2+m}} q^{\frac{1+m}{2+m}}$$

● - microporous sintered copper coating, thickness 0,4 mm
■-stainless steel microporous sintered coating, thickness 0,15 mm
▲ - stainless steel microporous sintered coating, thickness 0,22 mm
o- without coating



HEAT TRANSFER AT TRANSITION AND FILM BOILING OF FREON-113 ON SPHERE WITH DIMPLES AND MICROPOROUS SINTERED COATING

Теплоотдача при переходном и пленочном кипении фреона-113 на сферах с лунками и микропористым спеченным покрытием

Zhukov 2012



More significant influence of microporous sintered coating than dimples is visible at film boiling Микропористое спеченное покрытие оказывает большее влияние на пленочное кипение, чем облунение



Influence of microporous sintered coating on heat transfer in the transition and post-dryout regions at boiling of water in vertical tube and coil tube Влияние микропористого спеченного покрытия на теплоотдачу в переходной и закризисной областях при кипении воды в вертикальной и спиральной трубах



• - p = 1,0MPa; $\rho w = 22 \text{ kg/m}^2$ s; q = 70 kW/m² (with microporous sintered coating), 1 - water temperature

Microporous sintered coating shifts dryout in region of high vapor quality and decreases wall temperature pulsations



Microporous sintered coating increases heat transfer coefficient in post-dryout of coil tube two times



Dryout in horizontal tube with non- uniform heating Кризис теплообмена в горизонтальной трубе с неоднородным нагревом



Tube without coating

 $\rho W = 200 \text{ kg/(m^{2}*s)}; P = 0.4 \text{ MPa}, q (\phi=0) = 4.9 \text{ MW/m^{2}}$

All boiling modes arise on cooling surface of horizontal tube with non- uniform intensive heating

Microporous sintered coating increases critical heat flux three times



Уравнение для критической тепловой нагрузки при кипении недогретой воды в трубе с закрученной лентой на основе безразмерных критериев для построения скелетных

таблиц

Комендантов А.С., Круг А.Ф., Кузма-Кичта Ю.А., Стенина Н.А.

$$q_{cr}^{cal} = \frac{BO_{sw} \cdot \rho W \cdot r \cdot k_{y}}{k_{d}}$$

$$Bo_{sw} = 0.000061 \cdot We_{sw}^{-n} \cdot Pe_{sw}^{0.264} \cdot k_{p}^{0.25} \cdot D^{0.125} \cdot k_{l} \cdot X$$

$$k_{y} = \frac{\left[4 \cdot y^{2} + 2 \cdot \pi^{2}\right]^{0.5}}{2 \cdot y} \qquad k_{d} = 4\sqrt{\frac{d}{0.008}}$$

$$K_{l} = 1 + \left[0.155 \cdot |x|^{0.5} \cdot We_{sw}^{0.155} \cdot D^{0.25} \cdot k_{y}^{0.5} \cdot \left(\frac{p_{sp}}{3 \cdot p}\right)^{0.34}\right]^{2}$$

$$k_{l} = 1 + \frac{0.11 \cdot (L_{H}/d)^{0.25}}{B_{p}} \left[1 + \frac{55420}{(L_{H}/d)^{2.5} \cdot Pe_{sw}^{0.75}}\right] \cdot e^{-0.057 \cdot (L_{H}/d)}$$

$$B_{p} = 0.15 + 0.062 \cdot e^{42(p/p_{p})}$$

Отношение критической тепловой нагрузки, рассчитанной по ур. (1), к полученной в опытах для закрученных потоков при *x* < 0





Calculation of critical heat flux in horizontal tube with microporous coating and flow twisting for subcooled water:

Расчет критической тепловой нагрузки в горизонтальной трубе с микропористым покрытием и закруткой потока недогретой воды

$$q_{cr} = 9.1 \cdot 10^{-3} r_{\sqrt{\frac{\sigma \rho''}{d_H}}} \left(\frac{\rho'}{\rho''}\right)^{0.25} \left(\frac{\rho W d_H}{\mu'_s}\right)^{0.26} \psi_{SUB} \psi_{PC} \psi_{SW}$$

account subcooling:

$$\psi_{SUB} = 1 + 1.65 \left(\frac{\rho'}{\rho''}\right)^{0.25} \left[\frac{(T_s - T_l)C_p}{r}\right] \cdot \left(\frac{r}{C_p T_s}\right)^{0.25}$$

account microporous coating: $\psi_{PC} = 1 + 0.44 N^{0.1} \left(1 - 0.25 \operatorname{Re}_{s}^{0.1} \right)$ $N = \left(\frac{D_{\max} r \rho' \Delta T_{s}}{4 \sigma T_{s}} \right)^{m}$

account flow twisting:
$$\psi_{SW} = \left(\frac{d_{ef}}{d_H}\right)^{0.34} \left(\frac{g_{SW}}{g} + 1\right)^{0.12}$$

 $g_{SW} := 2 \cdot d_g \cdot \left(\frac{\pi \cdot W}{H}\right)^2$



Pool boiling of water with surfactants added Кипение дистиллированной воды с добавками поверхностно активных веществ(ПАВ)



A)- distilled water: 1-autor data 2- data Alad'ev and Yashnov, B) distilled water with surfactants added. 3) Cin=1.1x10-5 kg/kg, Cfin=6x10-6 kg/kg, 4) Cin=10-5 kg/kg, Cfin=10-6 kg/kg, 5) Cin=1.3x10-5 kg/kg, Cfin=2x10-6 kg/kg, 6) Cin=7x10-6 kg/kg, Cfin=6x10-6 kg/kg, 7) Cin=8x10-6 kg/kg, Cfin=4x10-6 kg/kg, P=0,1 MPa



Heat transfer coefficient increases for surfactants -water mixture up to 25%

Distribution of heat transfer coefficient a on channel length under boiling ов Распределение коэффициента теплоотдачи по длине канала при кипении водных растворов



q = 36 kW/m²; ρw = 16 kg/m²s; P = 0.76 MPa Heat transfer for water solutions is more than for water at low vapor contents. This effect is more for high salt contents. Heat transfer for water solutions lower then, for water at high vapor contents.



Modeling heat transfer under aqueous solutions boiling

Моделирование теплоотдачи при кипении водного раствора

According to model the supersaturation of aqueous solution takes place under vapor bubble in liquid microfilm, the

crystals are formed and fall on the wall. Additional centers of bubbles appear and heat transfer coefficient is growing.

$$N = N_{\text{natur}} + N_{\text{add}} \quad (1)$$
$$Q = r \rho'' u$$

$$u = R \frac{dR}{dt} \sqrt{N_0 + N_C}$$

$$R = \sqrt{\frac{12 \frac{\lambda \Delta T}{r \rho''}}{r \rho''}}$$
$$N_0 = \frac{10^{-8}}{R_*^2}$$

 $R_* = \frac{2\sigma T_s}{r \rho'' \, \Delta T}$

- q THERMAL FLUX
- r EVAPORATION HEAT
- p"- VAPOR DENSITY
- u DYNAMIC VELOCITY
- **R BUBBLE RADIUS**
- N₀ –MAIN NUCLEONIC CENTRES DENSITY
- λ -THERMAL CONDUCTIVITY
- **ΔT** TEMPERATURE DIFFERENCE
- t- TIME
- Nc NUCLEONIC CENTRES DENSITY
- T_{S} SATURATION TEMPERATURE
- σ SURFACE TENSION



Calculation of boiling heat transfer for water solutio Расчет теплоотдачи при кипении водного раствора

Yu. Zudin, Yu. Kuzma-Kichta 2000

Ration of heat transfer coefficient at boiling of water solution and water is determined by formula (2):

$$\frac{\alpha}{\alpha_{0}} = A + \sqrt{A^{2} + 1}$$

$$A = k \cdot C \cdot \sigma \cdot \sqrt{\frac{\lambda \cdot T_{s}}{r \cdot \rho'' \cdot q \cdot E}}$$
(2)

Where C- concentration, $E=10^{-22}$ J- dispersion interaction energy, $k=2.5 \cdot 10^{-7}$ -.



Dependence of heat transfer coefficient at boiling of sodium sulfate water solution from concentration

1- q=25 kW/m², 2- q=40 kW/m², 3- q=55 kW/m², 4- q=95 kW/m².



Nanoliquid boiling Кипение наножидкости

A.V.Lavrikov, Yu.A. Kuzma-Kichta, 2009



Surface with coating from nanoparticles SiC

1- water. 2- nanoliquid from water and nanoparticels SiC, concentration 0.01%

Heat transfer coefficient changes under boiling of nanoliquid. The main reason is the surface modification through deposition nanoparticles

При кипении наножидкости коэффициент теплоотдачи изменяется. Основной причиной является модификация поверхности путем осаждения наночастиц



Forming of nanoparticles layer on surface at nanoliquid boiling Формирование слоя наночастиц на поверхности при кипении наножидкости



Nikel surface with layer of nanoparticles from Al2O3. Thickness of nanoparticles layer on surface at boiling 1-2 mkm (present work)



The average thickness of Al2O3 nanoparticles (*10–100 nm) relief is 6 micrometers (Huiting and others, 2012).



Effect of initial surface roughness on heat transfer under nanoliquid boiling Влияние исходной шероховатости поверхности на теплоотдачу при кипении наножидкости



Relative vapor area above the test section. 1 - Rough tube Ra=0.16-2.5 mkm , 2- - Rough tube with the Al2O3 nano-relief

Heat transfer coefficient for the <u>rough</u> tube with the nano-relief decreased on 30% in comparison with the rough tube without coating. The coating of the <u>smooth</u> tube by nano-particles increases the heat transfer coefficient. Decreasing of the heat transfer coefficient for the rough tube with the relief can be explained with decreasing of the nucleation sites density

Comparison of calculated and experimental data of heat transfer at boiling of nanofluids with nanoparticles SiC and Al2O3 Сравнение расчетных и экспериментальных данных по теплоотдаче при кипении наножидкостей с наночастицами SiC и Al2O3



J. T. Cieslinski, T. Z. Kaczmarczyk, 2012

Boiling curve for nanofluid (water+ Al_2O_3 ,

0.01%), P=0.01MПa, proposed equation.

Dmax=150nm, coating thickness =300 nm

Boiling curves for distilled water and nanofluid(water+SiC, 0.01%), tube diameter 1.2mm, $P=0.1M\Pi a$, Dmax=100nm, coating thickness = 300 nm

ΔT, K

100

(experimental)

(calculated)

Critical heat flux for surface with nanorelief. Comparison with equation S.G.Kandlikar Критическая тепловая нагрузка для поверхности с нанорельефом. Сравнение с формулой S.G.Kandlikar



Критическая тепловая нагрузка увеличивается с уменьшением краевого угла



Cooling of heated sphere in subcooled water with nanoparticles Al_2O_3 Zhukov and other, 2016 Охлаждение нагретой сферы в недогретой воде с наночастицами Al_2O_3



Hyungdae Kim, Gregory DeWitt, 2009

• Water film boiling did not arise at cooling of heated sphere in nanoliquid under subcooling (10-15 K) in pool.

Boiling curves (a) pure water, (b) water with Al2O3 nanoparticles added (0.1 vol%), (c) water with Si (0.1 vol%) and (d) C nanoparticles added (0.1 vol%) at saturation conditions (SS-Sphere)

• Nanoparticles deposition on surface destabilizes the vapor film, the transition boiling starts at higher wall superheat

• . Particles of Al2O3, Si enhance heat transfer while the diamond particles do not have any effect

Leidenfrost temperature Температура Лейденфроста



A further important direction in the development of dependencies for determining temperature wetting is the consideration of the surface conditions



Микроканал. Рабочий участок, схема установки, метод измерения температуры стенки и тепловой нагрузки

Microchannel.Test section, installation scheme measure of temperature and heal flux







Принципиальная схема экспериментальной установки

1- бак с жидкостью, 2- насос, 3сглаживающий бак, 4- рабочий участок, 6- манометр, 5-конденсатор

Медный блок и термограмма его поверхности1-поверхность кипения2-контрольная поверхность3-электронагреватель



Effect of coating from nanopaticles on heat transfer at water boiling in microchannel

Влияние покрытия из наночастиц на теплоотдачу при кипении воды в микроканале

Microchannel 0.2x3.5x13.5 mm



Boiling curves for microchannel. G=0.171 g/s: 1-Copper surface; 2-Nano-relief (Al₂O₃)

The critical heat flux increases for the surfaces with relief from nanoparticles



Formation of coating at nanoliquid boiling Формирование покрытия при кипении наножидкости Lavrikov A.V., Shustov M.V., Kuzma-Kichta Y.A.,2016



Nanoparticles deposit at boiling in region of dray spots, where potential disappeared. Particles layer thickness is determined by microlayer of liquid under vapor bubble



Critical heat flux as a function of mass velocity Критическая тепловая нагрузка в зависимости от массовой скорости.



The equation describes satisfactorily experimental data

Полученное уравнение удовлетворительно описывает опытные данные

РАСЧЕТ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ В МИКРОКАНАЛЕ БЕЗ ПОКРЫТИЯ И С ПОКРЫТИЕМ ИЗ НАНОЧАСТИЦ

Сухов Б.Ю. Кузма-Кичта Ю.А.

Для микроканала без покрытия используется формула (1), полученная ранее для горизонтальной трубы с односторонним нагревом:

$$q_{\rm Kp0} = 9.1 \cdot 10^{-3} q_0 \cdot (\frac{\rho'}{\rho''})^{0.25} \cdot Re_s^{0.26} \tag{1}$$

где $Re_s = \frac{\rho W_0}{\mu_s} D_{\Gamma}; W_0 = \frac{\rho w}{\rho'}; q_0 = r \sqrt{\frac{\sigma \rho''}{D_{\Gamma}}}$

Для микроканала с покрытием из наночастиц расчет критической тепловой нагрузки проведен по формуле (2):

$$q_{\rm KP} = q_{\rm KP0} \,\psi_{\Pi,\Pi} \tag{2}$$

$$\psi_{\Pi,\Pi} = 1 + 0.44 N^{0,1} \left(1 - 0.25 \text{Re}_{s}^{0,1} \right)$$
 где $N = \left(\frac{D_{\text{max}} r \rho' \Delta T_{s}}{4 \sigma T_{s}} \right)^{m}$ $m = -16300 \frac{\delta_{\Pi,\Pi}}{\lambda_{3\phi}} + 4$
 $\gamma = 0.3;$

 ε 'и ε '' равными 0,25; ΔTs – рассчитывается по формуле Барча и Шредера-Рихтера: $\Delta Ts = Ts \cdot \left[\frac{1}{(1-0.6 \cdot \frac{Ts}{r})} - 1\right]$ $\lambda_{3\phi}$ – рассчитывается по формуле: $\lambda_{3\phi} = \gamma \lambda_{\kappa} + (1 - \gamma)(\frac{1-\varepsilon}{\lambda_{\kappa}} + \frac{\varepsilon'}{\lambda'} + \frac{\varepsilon''}{\lambda''})^{-1}$

Сопоставление экспериментальных и расчетных данных

по критической тепловой нагрузке для микроканало без Кузма-



1 – настоящая работа, 2 – Шустов М.В., 3 – Кузнецов В.В., 4 – расчет по формуле

(1)

Отклонение расчетных данных от экспериментальных результатов не превышает

Сопоставление экспериментальных и расчетных данных по критической тепловой нагрузке для микроканала с покрытием из наночастиц

Ю.А. Кузма-Кичта, 202



1 – работа Шустова М.В., 2 – расчет для канала без покрытия

по формуле (1),

3 – расчет для канала с покрытием по формуле (2) Покрытие из наночастиц приводит к росту критической тепловой нагрузки при кипении воды в микроканале в 1.5 раза. Предложенное уравнение описывает опытные данные с отклонением до 30%.

Dependence on a contact angle from the layer number of nanoparticles Al_2O_3 and hydrophobic treatments

Зависимость угла смачивания от количества слоев наночастиц Al₂O₃ и гидрофобизатора



number of layers

Contact angle dependence on nanoparticles Al2O3 layer number , blue – with processing by paste GOI, red - without processing Кол-во слоев number of layers

Contact angle dependence on hydrophobic treatment number



Level rise of a liquid due to capillary action in nanoparticles layer Подъем жидкости за счет действия капиллярных сил в слое наночастиц



Technology

- Sample №1. Nanoparticles Al2O3+water= gomogeneous coating, level rise of fluid =3 mm
- Sample N_2 . Nanoparticles Al2O3+water+ isopropanol = coating with microtrenches, level rise of fluid =12 mm



Level rise of a fluid is increased up to several times sample No2. The main reason is forming microtrenches in nanoparticles layer.

Подъем жидкости увеличивается в несколько раз для образца №2. Основная причинаобразование микротраншей в слое наночастиц.



Level rise of a liquid. Water-isopropanol 50% in coating from nanoparticles Al2O3

Капиллярная высота подъема жидкости вода-изопропанол 50% в покрытии из частиц Al2O3 (≈50 нм)



В случае а) и б) высота подъема жидкости больше, чем в случае в), вследствие образования микротраншей в слое наночастиц



Resource test of coating from nanoparticles and polimer film at boiling in installation with natural circulation

Ресурсное испытание покрытия из наночастиц и полимерной пленки при кипении в установке с естественной циркуляцией



SEM photo (TU Braunschweig): 1) clear surface, 2) SiC coating,3) SiC+polymer coating (HBNP-coating)



Resource test of tube with coating from nano particles and polymer film (q1 "fresh tube" experiment, q2 experiment after two months of operation), water, p = 0.2 bar, for different liquid levels (80 % - 120%)



Contact angles with different surfaces:1) Stainless steel; 2) Stainless steel with SiC (50-500 nm) particles; 3) Stainless steel covered by particles and polymer (HBNP-coating).

"Method of nanorelief forming on the heat transfer surfaces of devices".Yu.Kuzma-Kichta et.al. Patent #2433949,2011



Strength definition method for coating from ceramic nanoparticles Способ определения прочности покрытия из керамических наночастиц Patent №2559334, 2015, Kuzma-Kichta Y.,Lavrikov A.



Strength definition method for coating from ceramic nanoparticles . According to the method coating is scanned by electron beam on tangent to the substrate at increasing of current. Coating strength is determined by energy that is need to detachment particles from coating



Application Применение

Отложения водосчетчиков систем теплоснабжения с облуненной поверхностью и без облунения Depositions of water meters of heat supply systems with dimples and without dimples

Methods of heat transfer enhancement on macro-, micro - and nanoscales 2013 Kuzma-Kichta. Y. A



Housing of the water meter with hemispherical dimples(left) and housing of the water meter without dimples (right) after resource tests during the year

The test results showed that the housing of the water meter without dimples after a year of operation is covered with deposits, whereas on the housing of the water meter with dimples deposits are almost absent



Application in microchannel Применение в микроканале

Microchannel with coating from nanoparticles is used for invertor cooling Охлаждение автомобильного инвертора с помощью микроканала с покрытием из наночастиц



TOYTA PRIUS INVERTOR. OVERHEATING DANAGED TRANSISTORS

POWER BLOCK WITH MICRO CHANNEL COOLING FOR SMART INVERTER





Thermosyphon with nanocoating is used for thermal stabilization of the soil on single-deck railroad embankment and slightly inclined composite heat stabilizer are set in base of multi –track iron railway embankment

Application of heat stabilizer with nanocoating for thermal stabilization of the soil on single-and multi- deck railroad embankment

Применение термостабилизатора с нано покрытием для термостабилизации грунта на однои многоярусные железнодорожной насыпи







Conclusion Заключение

•Microporous coating with low thermal resistance increases heat transfer coefficient at boiling to 10 times owing to additional nucleation sites forming.

•Microporous coating shifts the transition to post-dryout in region of larger vapor content owing to wettability improvement and critical heat flux increases to 3 times

Микропористое покрытие с низким термическим сопротивлением увеличивает коэффициент теплоотдачи при кипении до 10 раз за счет образования дополнительных центров парообразования.

• Микропористое покрытие сдвигает переход в закризисную область в зону высоких паросодержаний и критический тепловой поток возрастает до 3 раз, благодаря улучшению смачиваемости.



•Similar intensification of heat transfer arises during water solution boiling, nanoliquid boiling.

•Подобная интенсификация теплообмена возникает при кипении водного раствора и наножидкости.

•Equations for heat transfer calculation at boiling on surface with microporous coatings are proposed.

•Предложены уравнения для расчета теплоотдачи при кипении на поверхности с микропористым покрытием.

•Boiling heat transfer coefficient and critical heat flux increase at boiling in microchannel with nanorelief

• В микроканале с нанорельефом увеличиваются критический тепловой поток и теплоотдача при переходном кипении









Lavrikov A.V.



Zhukov V.M.





Shustov M.V.

Many thanks. Therefore, I tried today to explain you our results clear enough – at the same time trying to understand them myself!

