



چهارمین کنفرانس مشعل و کوره‌های صنعتی

تهران، ۲۹ خرداد ۱۳۹۳ هجری: هم‌اندیشان انرژی کیمیا

تلفن تهران: ۸۸۶۷۱۶۷۶ www.Koureh.ir

بررسی آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت جوشش استخری آب خالص و اتانول خالص

گوهرشاد حسینی^۱، سحر حافظی بیرگانی^۲

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ماهشهر، گروه مهندسی شیمی، ماهشهر، ایران

Goharshad_hosseini@yahoo.com

چکیده

در این پژوهش، ضریب انتقال حرارت جوشش استخری در ناحیه جوشش هسته‌ای برای آب خالص و اتانول خالص در گستره‌ی شار حرارتی ۱۰۰۰۰۰-۵۰۰۰ وات بر متر مربع بر روی استوانه‌ی افقی از جنس فولاد ضد زنگ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل، افزایش ضریب انتقال حرارت با افزایش شار حرارتی را نشان می‌دهد و این روند برای ضریب انتقال حرارت آب خالص بیش‌تر از اتانول خالص در شرایط یکسان می‌باشد. مقایسه نتایج آزمایشگاهی با روابط موجود نشان می‌دهد که رابطه استفان و عبدالسلام با خطای حدود ۴ درصد، کم‌ترین مقدار خطا را با داده‌های آزمایشگاهی آب خالص و اتانول خالص دارد.

واژه‌های کلیدی: جوشش، ضریب انتقال حرارت، اتانول خالص، آب خالص

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد ماهشهر

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد ماهشهر



چهارمین کنفرانس مشعل و کوره‌های صنعتی

تهران، ۲۹ خرداد ۱۳۹۳ هجری: هم‌اندیشان انرژی کیمیا

تلفن تهران: ۸۸۶۷۱۶۷۶ www.Koureh.ir

۱- مقدمه

تبخیر در سطح مشترک جامد - مایع را جوشش می‌نامند. این فرآیند زمانی رخ می‌دهد که دمای سطح از دمای اشباع مربوط به فشار مایع تجاوز کند. فرآیند جوشش به عنوان فرآیندی کاربردی در بسیاری از فرآیندهای صنعتی از جمله بویلرها، دستگاه‌های تهویه و تبرید و دیگ‌های بخار جهت انتقال بارهای حرارتی سنگین استفاده می‌شود. ساخت، طراحی و بهینه‌سازی این واحدهای صنعتی به‌خصوص بویلرهای صنعتی نیازمند پیشگویی علمی ضریب انتقال حرارت بین سطح گرم شونده و مایع در حال جوشش می‌باشد.

علی‌رغم مطالعات گسترده انجام شده در زمینه جوشش استخری، مکانیسم‌های بنیادی این فرآیند از جمله زیرفرایندهایی چون قطر حباب، دانسیته نقاط مولد حباب و فرکانس جدایی حباب به‌طور کامل شناخته نشده است. روابط زیادی برای پیش‌بینی ضریب انتقال حرارت جوشش مایعات خالص ارائه گردیده است که این روابط عموماً تجربی یا نیمه تجربی می‌باشند.

تا اواخر سال ۱۹۶۲، رابطه‌ی مکنلی [1]، به عنوان معتبرترین مدل پیشگویی ضریب انتقال حرارت مایعات خالص مورد استفاده قرار می‌گرفت که در آن از خواص فیزیکی فاز مایع در حال جوشش و فاز بخار استفاده شده است. این رابطه‌ی نیمه تجربی به‌رغم قدمتی که دارد، با بسیاری از داده‌های آزمایشگاهی تطابق قابل قبولی دارد.

در اوایل سال ۱۹۶۳ موستینسکی [2]، با استفاده از قانون حالات متناظر و انجام آزمایش‌های متعددی بر روی شار حرارتی بحرانی، یک رابطه‌ی ریاضی جهت محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت جوشش به‌صورت تابعی از فشار کاهیده ارائه داد.

در سال ۱۹۶۷ مدل کامل تری توسط بویکو و کروژیلین [3]، ارائه شده است که در آن از خواص فیزیکی بیشتری برای محاسبه و پیشگویی ضریب انتقال حرارت استفاده گردیده است. این مدل که از طریق آنالیز ابعادی بدست آمده بود مقادیر دقیق‌تری از ضریب انتقال حرارت مایعات خالص را محاسبه نموده است.

در سال ۱۹۷۲ لابانتسوو [4]، یک رابطه‌ی نیمه تجربی برپایه‌ی تعداد زیادی داده‌های آزمایشگاهی، بیش از ۲۰۰ ماده، ارائه داد. این رابطه هم‌پوشانی خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشت و هنوز هم برای مقایسه‌ی داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفان و عبدالسلام [5]، با کاهش دادن میزان انحراف ضریب انتقال حرارت از داده‌های تجربی، یکی از دقیق‌ترین روابط را برای پیشگویی ضریب انتقال حرارت جوشش در مایعات خالص ارائه دادند. این رابطه با استفاده از رگراسیون چندگانه، با بهره‌گیری از حجم عظیمی از داده‌های آزمایشگاهی - بیش از ۵۰۰ ماده - به‌دست آمده است. در این رابطه، خواص ترموفیزیکی سیال به‌صورت بدون بعد تبدیل شده است.



چهارمین کنفرانس مشعل و کوره‌های صنعتی

تهران، ۲۹ خرداد ۱۳۹۳ هجری: هم‌اندیشان انرژی کیمیا

تلفن تهران: ۸۸۶۷۱۶۷۶ www.Koureh.ir

در سال ۱۹۸۲ نیشیکاوا و همکارانش [6]، یک رابطه‌ی نیمه تجربی برگرفته از اصلاح داده‌های آزمایشگاهی قبلی، بر مبنای تشابهات ترمودینامیکی خواص ترموفیزیکی سیال، پارامترهای کاهیده و اصل حالات متناظر ارائه نمود.

در سال ۱۹۸۴ کوپر [7]، با استفاده از ۶۰۰۰ داده‌ی آزمایشگاهی منتشر شده از منابع گوناگون، که حاصل یک صد سری آزمایش ضریب انتقال جوشش استخری می‌باشد، رابطه‌ای شامل فشار کاهیده، زبری سطح و نیز جرم مولکولی سیال ارائه داد.

در جدول شماره (۱) روابط مربوط به پیشگویی ضریب انتقال حرارت مایعات خالص ارائه شده است.

جدول ۱- مهم‌ترین روابط کاربردی برای ضریب انتقال حرارت جوشش

محقق	ضریب انتقال حرارت
McNelly [1]	$\alpha = 0.225 \left(\left[\frac{qC_l}{Ah_{fg}} \right]^{0.69} \left[\frac{PK_l}{\sigma} \right]^{0.31} \left[\frac{p_l}{p_v} - 1 \right]^{0.33} \right)$
Mostinski [2]	$\alpha = b \cdot p_c^{0.69} \left(\frac{q}{A} \right)^{0.7} \left[1.8 \times \left[\frac{p}{p_c} \right]^{1.7} + \left[\frac{p}{p_c} \right]^{1.2} + \left[\frac{p}{p_c} \right]^{1.0} \right]$
Kruzhilin [3]	$\alpha = 0.082 \left(\frac{K_l}{l^*} \right) \left[\frac{h_{fg} q}{Ag(T_s + 273)K_l} \left(\frac{p_v}{pl - pv} \right) \right]^{0.7} \left[\frac{(T_s + 273)C_{pl}\sigma P}{h_{fg}^2 \rho v^2 l^*} \right]^{0.33}$ $l^* = \left[\frac{\sigma}{g(p_l - pv)} \right]^{0.5}$
Labantsov [4]	$\alpha = 0.075 \left(1 + 10 \left(\frac{p_v}{pl - pv} \right)^{0.67} \right) \left(\frac{k_1^2}{\sigma \vartheta (T_s + 273)} \right)^{0.33} q^{0.67}$
Stephan- abdelsalam [5]	$\alpha = 0.23 \left(\frac{K_l}{d_b} \right) \left[\frac{qd_b}{AK_l T_s} \right]^{0.674} \left[\frac{\rho_v}{\rho_l} \right]^{0.297} \left[\frac{h_{fg} d_b^2}{\alpha_l^2} \right]^{0.371} \left[\frac{\alpha_l^2 \rho_l}{\sigma d_b} \right]^{0.35} \left[\frac{(\rho_l - \rho_v)}{\rho_l} \right]^{-1.73}$
Nishikawa et al [6]	$\alpha = \frac{31.4 P_c^{0.2}}{m_w^{0.1} T_c^{0.9}} (8R_p)^{0.2 \times (1 - p_r)} \frac{p_r^{0.23} q^{0.8}}{(1 - 0.99p_r)^{0.9}}$ $R_p = 0.125 \mu m$
Copper [7]	$\alpha = 55 P_r^{(0.12 - 0.443 R_p)} (-\log P_r)^{-0.55} M_w^{-0.5} \left(\frac{q}{A} \right)^{0.67}$



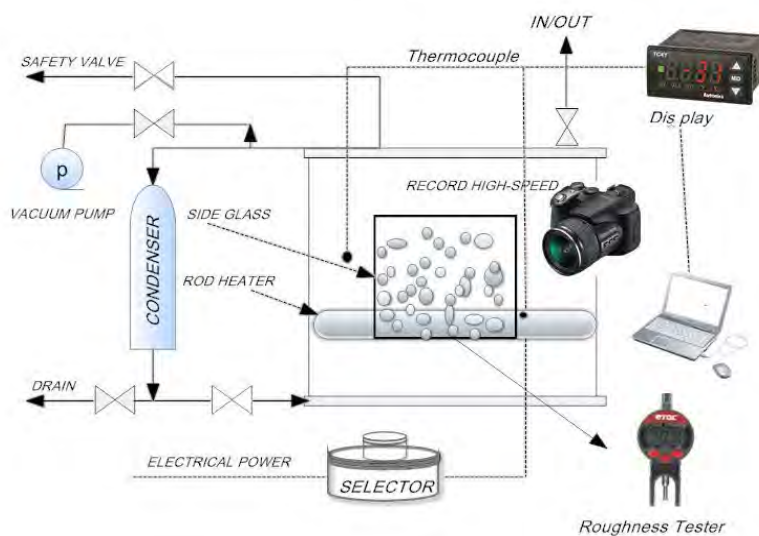
۲- دستگاه آزمایشگاهی

دستگاه مورد استفاده جهت اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت دستگاه جوشش استخری گورنفلو می‌باشد. دستگاه دارای یک ظرف شیشه‌ای از جنس سکوریت با ابعاد مشخص و حجم تقریبی $0.066 m^3$ می‌باشد. مایع مورد نظر در ظرف ریخته می‌شود. درون ظرف یک ترمومتر وجود دارد که دمای بالک را اندازه‌گیری می‌کند آزمایش‌ها بر روی یک میله از جنس فولاد ضد زنگ^۳ که به صورت افقی درون ظرف تعبیه شده‌است انجام می‌شود. درون این میله، یک لامپ مدادی تعبیه شده‌است که به صورت سری به منبع تغذیه (اتوترانس) و آمپرسنج متصل می‌باشد. اتوترانس، جریان برق عبوری از لامپ را با اعمال ولتاژی بین ۱۵-۲۱۰ تامین می‌سازد. در فاصله‌ی $2 mm$ از سطح میله، چهار سوراخ به طور متقارن ایجاد شده‌است که محل تعبیه‌ی ترموکوپل‌ها می‌باشد. این ترموکوپل‌ها به نمایشگرهایی متصل می‌باشند که دما را نمایش می‌دهند. همچنین یک کندانسور جهت بازگردانی بخارات ناشی از فرآیند جوشش در بالای آن تعبیه شده است.

با استفاده از اطلاعات ثبت شده از دمای ترموکوپل‌ها، دمای اشباع خوانده شده از ترمومتر، آمپر و ولتاژ در هر مرحله و در نهایت با استفاده از قانون سرمایش نیوتن، ضریب انتقال حرارت به دست می‌آید:

$$q'' = \alpha(T_w - T_{sat}) \quad (1)$$

T_w دمای سطح استوانه دمای اشباع مایع اطراف استوانه می‌باشد. از حاصل ضرب اختلاف پتانسیل الکتریکی در شدت جریان الکتریکی برای محاسبه‌ی شار حرارتی استفاده می‌شود. در شکل (۱) نمای کلی دستگاه مشاهده می‌شود.



³ Stainless Steel



چهارمین کنفرانس مشعل و کوره‌های صنعتی

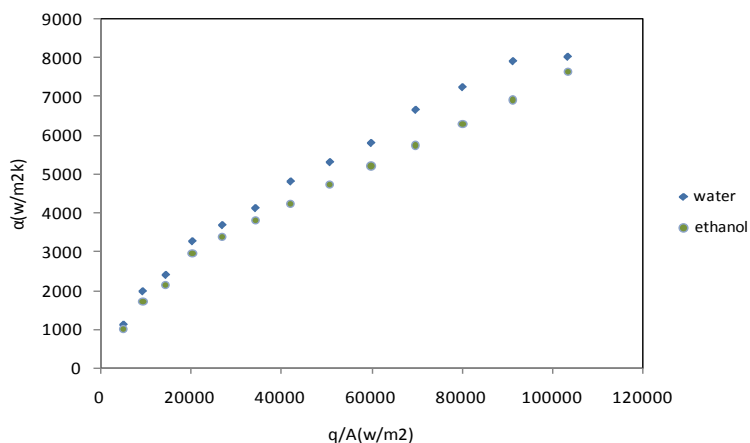
تهران، ۲۹ خرداد ۱۳۹۳ هجری: هم‌اندیشان انرژی کیمیا

تلفن تهران: ۸۸۶۷۱۶۷۶ www.Koureh.ir

شکل (۱): دستگاه آزمایشگاهی

۴- نتایج آزمایشگاهی

پس از ثبت دمای ترموکوپل‌ها و تصحیح آن به عنوان دمای سطح و هم‌چنین محاسبه شار حرارتی در هر ولتاژ، با استفاده از قانون سرمایش نیوتن ضریب انتقال حرارت قابل محاسبه می‌باشد. نمودار (۱) تغییرات این پارامتر بر حسب شار حرارتی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نمودار (۱) مشخص است با افزایش شار حرارتی ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. علت این پدیده را می‌توان به افزایش سرعت رشد حباب‌های بخار و در نتیجه آن افزایش آشفتگی جریان حول سطح انتقال حرارت دانست. ضریب انتقال حرارت آب خالص از اتانول خالص در شار حرارتی یکسان بیش‌تر می‌باشد. شاید علت آن را باید در خواص فیزیکی متفاوت آن‌ها در حین فرآیند جوشش جست‌وجو کرد. اما از آن‌جا که جوشش تابعی پیچیده از گستره‌ی وسیعی از خواص فیزیکی می‌باشد، توجیه این مسئله با بررسی یک خاصیت فیزیکی به صورت مجزا امکان‌پذیر نمی‌باشد.



نمودار (۱): نتایج آزمایشگاهی جوشش آب خالص و اتانول خالص

ضریب انتقال حرارت به دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی آب خالص و اتانول خالص با روابط ارائه شده در جدول (۱) مقایسه شد. نتیجه به صورت تغییرات ضریب انتقال حرارت با شار حرارتی در نمودار (۲) و (۳) مشاهده می‌شود. هم‌چنین مقدار خطای روابط نسبت به داده‌های آزمایشگاهی آب خالص و اتانول خالص در جدول (۲) ارائه شده است.

در همه‌ی روابط، با افزایش شار حرارتی ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. خطای روابط برای آب خالص و اتانول خالص با هم متفاوت می‌باشد. رابطه‌ی استفان و عبدالسلام با مقدار خطای حدود ۴ درصد، کم‌ترین مقدار خطا را با داده‌های آزمایشگاهی آب خالص و اتانول خالص دارد. این رابطه یکی از دقیق‌ترین روابط پیشگویی ضریب انتقال حرارت جوشش مایعات خالص می‌باشد که با استفاده از رگرسیون چندگانه، با بهره‌گیری از حجم عظیمی از داده‌های آزمایشگاهی - بیش از ۵۰۰ ماده - به دست آمده است.

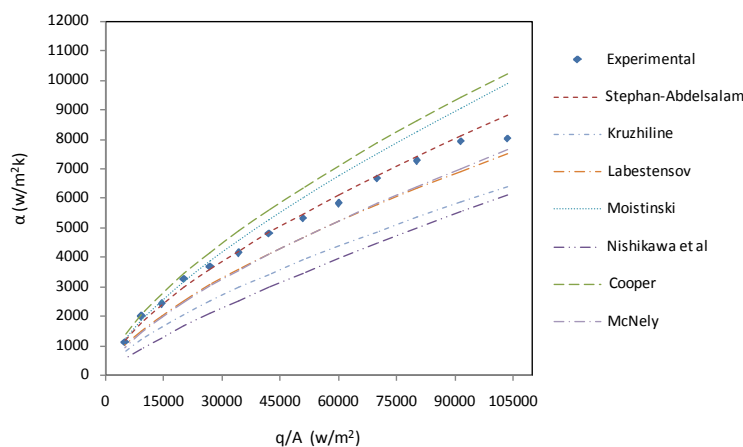


چهارمین کنفرانس مشعل و کوره‌های صنعتی

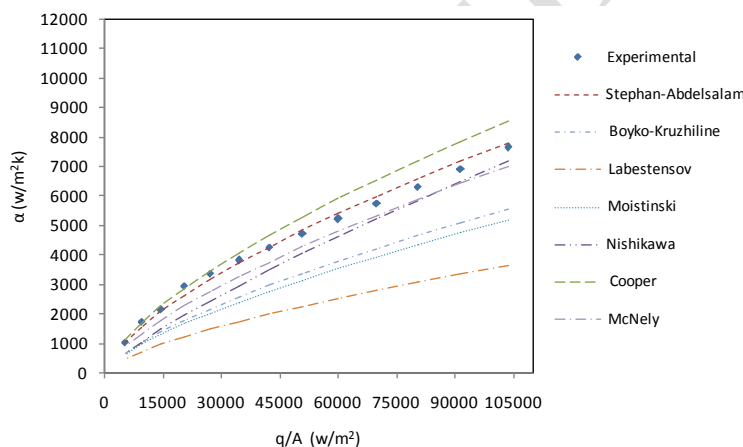
تهران، ۲۹ خرداد ۱۳۹۳ هجری: هم‌اندیشان انرژی کیمیا

www.Koureh.ir

تلفن تهران: ۸۸۶۷۱۶۷۶



نمودار (۲): مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت آب خالص با روابط موجود



نمودار (۳): مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت اتانول خالص با روابط موجود

جدول (۲): خطای روابط ضریب انتقال حرارت با نتایج آزمایشگاهی آب خالص و اتانول خالص

کوپر	نیشیکاوا و همکاران	استفان و عبدالسلام	لابانتسوو	کروژیلین	مویستنسکی	مکنلی	
۱۶/۶۴	۳۹/۰۵	۴/۳۷	۱۴/۲۳	۲۹/۳۳	۱۰/۷۵	۱۵/۰۴	آب خالص
۹/۱۱	۲۰/۳۶	۴/۲۸	۵۳/۸۱	۳۱/۵۱	۳۶/۱۹	۱۳/۱۷	اتانول خالص



چهارمین کنفرانس مشعل و کوره‌های صنعتی

تهران، ۲۹ خرداد ۱۳۹۳ هجری: هم‌اندیشان انرژی کیمیا

تلفن تهران: ۸۸۶۷۱۶۷۶ www.Koureh.ir

۵- نتیجه‌گیری

ضریب انتقال حرارت جوشش برای آب خالص و اتانول خالص در گستره شار حرارتی ۱۰۰۰۰۰-۵۰۰۰ وات بر متر مربع در فشار اتمسفری بررسی شد. نتایج حاصل، افزایش ضریب انتقال حرارت با افزایش شار حرارتی را نشان می‌دهد. علت این پدیده را می‌توان به افزایش سرعت رشد حباب‌های بخار و در نتیجه آن افزایش آشفتگی جریان حول سطح انتقال حرارت دانست. هم-چنین ضریب انتقال حرارت آب خالص از اتانول خالص در شار حرارتی یکسان بیش‌تر می‌باشد که با توجه به وابستگی پیچیده‌ی ضریب انتقال حرارت به خواص فیزیکی، توجیه این مسئله با بررسی خاصیت فیزیکی امکان‌پذیر نمی‌باشد. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی با روابط موجود نشان می‌دهد که رابطه استفان و عبدالسلام با خطای حدود ۴ درصد، کم‌ترین مقدار خطا را با داده‌های آزمایشگاهی آب خالص و اتانول خالص دارد.

مراجع

- [1]. McNelly, M. J., "A Correlation of rates of heat transfer to nucleate boiling of liquids", Imperial College Chem.Eng.Soc. 7, PP 18-34, 1953.
- [2]. Mostinski, I.L., "Application of the rule of corresponding states for calculation of heat transfer and critical heat flux", J.Teploenergetik 10(4), PP 66-71, 1963.
- [3]. Kruzhilin, B., "Heat Transfer and Hydraulic Resistance during Condensation of Steam in a Horizontal Tube and in a Bundle of Tubes", J. Heat and Mass Transfer 10, PP 361-734, 1967.
- [4]. Labuntsov, D.A., "Heat transfer problems with nucleate boiling of liquids", J. Therm.Eng 19, PP 21-28, 1972.
- [5]. Stephan, K., Abdelsalam, K., "Heat transfer correlation for natural convection boiling", J. Heat and Mass Transfer 23, PP 73-87, 1980.
- [6]. Nishikawa, K., Fujita, Y., Ohta, H., Hidaka, S., "Effects of system pressure and surface roughness on nucleate boiling heat transfer", Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University 42(2), PP 95-111, 1982.
- [7]. Cooper, M.G., "Saturation nucleate pool boiling a simple correlation", IChemE Symposium 86, PP 786-793, 1984.



چهارمین کنفرانس مشعل و کوره‌های صنعتی

تهران، ۲۹ خرداد ۱۳۹۳ مجری: هم‌اندیشان انرژی کیمیا

تلفن تهران: ۸۸۶۷۱۶۷۶ www.Koureh.ir

اختصارات

پارامترها			زیر نویس				
d	قطر	g	شتاب گرانش	exp	آزمایشگاهی	fg	تبخیر
T	دما	α	ضریب پخش حرارتی	c	بحرانی		
θ	زاویه تماس	p	فشار	w	دیواره		
σ	کشش سطحی	q''	شار حرارتی	sat	اشباع		
ρ	دانسیته	C	ظرفیت گرمایی	b	حباب		
H	انتالپی	h	ضریب انتقال حرارت	l	مایع		
A	سطح			v	بخار		