

اثربه‌ای شدن حرارتی بر آهنگ انتقال جرم سیال در کانال عمودی گرم

صمد خاکشورنیا، ابوالقاسم زارع شحنه

مرکز تحقیقات هسته‌ای سازمان انرژی اتمی ایران

چکیده

وآکتور تحقیقاتی کم قدرتی با صفحات سوخت عمودی درون یک مخزن حاوی سیال خنک کننده مورد نظر است. در حالتی که نیروی محرکه پمپ وجود ندارد، سیال به سبب تغییر چگالی خود در کانال سوخت به طور طبیعی جابجا می‌شود و گردش طبیعی^۱ ایجاد می‌گردد. به کمک معادلات بقا و با استفاده از چند پیش فرض می‌توان انتقال جرم سیال را بررسی کرد.

چنانچه بدنه مخزن دارای پوشش عایق حرارتی باشد با توجه به محدود بودن ابعاد آن، می‌توان انتظار داشت که با گذشت زمان، به علت ظهور پدیده لایه‌ای شدن حرارتی^۲ در سیال، انتقال جرم ناشی از گردش طبیعی کاهش یابد. نتایج حاصل از بررسی این اثر نشان می‌دهند که در مخزنی که به طور خطی لایه‌ای شده است، انتقال جرم سیال بسته به پارامتر لایه‌ای شدن تا حد ۴۱ درصد به طور غیر خطی کاهش می‌یابد.

فهرست نمادها

نماد	کمیت	یکا	دمای سیال داخلی مخزن در ارتفاعات مختلف
A	سطح مقطع عبور سیال	m^2	$T_{\infty}(z)$
c_p	ظرفیت گرمایی ویژه	$J/kg.K$	عرض صفحه سوخت
D_e	هم ارز قطر کانال	m	W
f	ضریب اصطکاک دیواره کانال	--	سرعت انتقال جرم در شاخه دلخواه k
g	شتاب گرانشی	m/s^2	G_k
L	طول کانال	m	z
L_{ch}	طول قسمت خروجی کانال	m	β
L_k	طول کانال در شاخه دلخواه k	m	δ
\dot{m}	آهنگ انتقال جرم سیال	kg/s	Δp_{β}
Re	عدد رینولدز	--	Δp_{ϕ}
Q	توان رآکتور	W	Δp_{pump}
q''	شار حرارتی	W/m^2	ΔT_{rise}
s	عرض کانال	m	μ
t	زمان	s	ρ
$T_{\infty,ave}$	دمای متوسط سیال خنک کننده داخل مخزن	$^{\circ}C$	ρ_c
$T_{\infty,10}$	دمای اولیه سیال خنک کننده داخل مخزن	$^{\circ}C$	

۱- مقدمه

$$T_{\infty}(z) = T_{\infty,0} + \delta z \quad 0 \leq z \leq L + L_{ch} \quad (1)$$

یعنی دمای سیال درون مخزن در راستای عمودی z با گرادینان δ (افزایش دمای مخزن در واحد طول) افزایش می‌یابد.

معادله حرکت برای یک مدار بسته فرضی جریان سیال به صورت زیر است [۴]:

$$\sum L_k \frac{\partial G_k}{\partial t} = \Delta P_{pump} - \Delta P_f + \Delta P_B \quad (2)$$

معادله (۲) برای سیستمهای جریان سیال با سازوکار گردش طبیعی (بدون پمپ خارجی) و در حالت پایدار به صورت (۳) ساده می‌شود:

$$\Delta P_f = \Delta P_B \quad (3)$$

افت فشار ناشی از اصطکاک سیال در طول صفحات سوخت و در طول خروجی متصل به آن عبارتست از:

$$\Delta P_f = f \frac{L + L_{ch}}{D_e} \rho_c \frac{V^2}{2} = f \frac{\dot{m}^2 (L + L_{ch})}{2 D_e \rho_c A^2} \quad (4)$$

f ضریب اصطکاک دیواره کانال است که برای جریان سیال با جابجایی طبیعی به صورت زیر برآورد می‌شود [۴]:

$$f = 0.184 Re^{-0.2} = 0.184 \left[\frac{\dot{m} D_e}{A \mu} \right]^{-0.2} \quad (5)$$

افت فشار ناشی از اصطکاک برابر خواهد بود با:

$$\Delta P_f = 0.184 \left[\frac{D_e}{A \mu} \right]^{-0.2} \left[\frac{L + L_{ch}}{2 D_e A^2} \right] \left[\frac{1}{\rho_c} \right] \dot{m}^{1.8} \quad (6)$$

از طرف دیگر فشار ناشی از شناوری برابر است با:

$$\Delta P_B = (\rho - \rho_c) g (L + L_{ch}) \quad (7)$$

و چگالی متوسط سیال در کانال و خروجی آن بنا به تعریف به صورت زیر است:

گردش طبیعی سیال در طبیعت مصادیق فراوان دارد. استفاده از جریان سیال با همرفتی طبیعی در رآکتورهای هسته‌ای و بررسی آن نیز مورد توجه می‌باشد و نقش مهم آن در سرد کردن دراز مدت رآکتورهای هسته‌ای با آب سبک حائز اهمیت است [۲۱].

صفحات سوخت در رآکتور استخر دار تهران، کانالهای عمودی را تشکیل می‌دهند که سیال خنک کننده (آب) در ضمن چرخش خود در آنها گرم می‌شود و پس از دادن گرمای خود به محیط، به دمای اولیه می‌رسد و این چرخش مرتباً ادامه می‌یابد. در این مقاله چگونگی انتقال حرارت به وسیله سیال به طریق جابجایی طبیعی (همرفتی) در این کانالها، درون مخزنی منفرد و بدون ساز و کار ویژه‌ای برای خنک کردن آن، مورد مطالعه قرار گرفته است، بدین ترتیب که ابتدا با استفاده از یک مدل ساده مبتنی بر قوانین بقا، میزان انتقال جرم ناشی از گردش طبیعی سیال به عنوان تابعی از پارامتر لایه‌ای شدن و همچنین طول قسمت غیر فعال موجود در انتهای بالایی صفحات سوخت (بدون وجود ماده شکافت پذیر) که به عنوان طول خروجی متصل به کانال (مشابه ارتفاع دودکش) عمل می‌نماید محاسبه شده، سپس با استفاده از داده‌های رآکتور تهران اثر کمی و کیفی لایه‌ای شدن و نقش طول غیر فعال سوخت در گردش طبیعی سیال نشان داده شده است.

۲- محاسبه آهنگ انتقال جرم سیال در کانال عمودی گرم با در نظر گرفتن پدیده لایه‌ای شدن سیال در اثر حرارت درون مخزنی منفرد با ابعاد محدود

در شرایطی که مخزن منفرد و دارای ابعاد محدودی باشد، سیال گرم در راستای افقی درون سیال سرد مخزن حرکت می‌کند و در انتهای فوقانی مخزن در لایه مرزی حرارتی تخلیه می‌شود. لایه‌های گرم در دراز مدت بر روی لایه‌های سرد سیال قرار می‌گیرند و یک مخزن لایه‌ای حرارتی رابه وجود می‌آورند [۳]. در این حالت، انتظار می‌رود که با افزوده شدن اثر لایه‌ای در سیال داخل مخزن، آهنگ انتقال حرارت به طریقه همرفتی کاهش یابد، زیرا در این شرایط اختلاف دمای مؤثر بین صفحه سوخت و سیال کم می‌شود. اینک، فرض می‌کنیم که لایه‌ای شدن درون مخزن به صورت خطی انجام پذیرد. بنابراین:

ρ و ρ_{out} به ترتیب برابر خواهند بود با:

$$\rho_{out} = \rho \left[1 + \beta (T_{\infty,ave} - T_{\infty,0} - \frac{Q}{\dot{m} c_p}) \right] \quad (14)$$

$$\rho = \frac{1}{L} \int_0^L \rho(z) dz = \rho \left[1 + \beta (T_{\infty,ave} - T_{\infty,0}) - \frac{\beta}{2} \frac{Q}{\dot{m} c_p} \right] \quad (15)$$

بنابراین چگالی متوسط سیال در کانال جریان و خروجی کانال با توجه به رابطه (۸) برابر است با:

$$\rho_c = \rho \left[1 + \beta (T_{\infty,ave} - T_{\infty,0}) - \frac{\beta}{2} \frac{Q}{\dot{m} c_p} \frac{L + 2L_{ch}}{L + L_{ch}} \right] \quad (16)$$

با تلفیق دو معادله (۷) و (۱۶) فشار ناشی از شناوری برابر خواهد بود با:

$$\Delta P_{\beta} = \rho \left[\frac{\beta}{2} \frac{Q}{\dot{m} c_p} (L + 2L_{ch}) - \beta (T_{\infty} - T_{\infty,0}) (L + L_{ch}) \right] g \quad (17)$$

با معادل قراردادن (۱۷) با (۶) با توجه به معادله (۳) خواهیم داشت:

$$\dot{m}^{1.8} = 5.44 \rho^2 \beta \left[\frac{Q}{2 \dot{m} c_p} \right] (L + 2L_{ch}) - (T_{\infty,ave} - T_{\infty,0})(L + L_{ch}) \left[\frac{D_e}{A_{\mu}} \right]^{+0.2} \left[\frac{2D_e A^2}{L + L_{ch}} \right] \left[1 - \frac{\beta}{2} \frac{Q}{\dot{m} c_p} \frac{L + 2L_{ch}}{L + L_{ch}} + \beta (T_{\infty,ave} - T_{\infty,0}) \right] g \quad (18)$$

برای محاسبه \dot{m} با توجه به رابطه (۱۹) می توان معادله (۱۸) را بر حسب q'' (شار حرارتی تولید شده در کانال) نیز نوشت:

$$Q = q'' (2WL) \quad (19)$$

$$\rho_c = \frac{\rho L + \rho_{out} L_{ch}}{L + L_{ch}} \quad (8)$$

در این رابطه ρ_{out} چگالی سیال در خروجی کانال و ρ چگالی متوسط در کانال جریان است.

برای سهولت تحلیل فرض می کنیم که شار حرارت تولید شده در صفحات سوخت یکنواخت باشد. بنابراین، می توان نشان داد که دمای سیال در کانال به طور خطی افزایش می یابد:

$$T(z) - T_{\infty,0} = \Delta T_{rise} \frac{z}{L} \quad 0 \leq z \leq L \quad (9)$$

$$T(z) - T_{\infty,0} = \Delta T_{rise} \quad L \leq z \leq L + L_{ch} \quad (10)$$

چنانچه تغییرات چگالی سیال در طول کانال بر حسب دما از تقریب بوسینسک^۲ پیروی نماید [۸،۳] خواهیم داشت:

$$\rho(z) = \rho \left[1 - \beta (T(z) - T_{\infty,ave}) \right] \quad (11)$$

از سوی دیگر داشتیم:

$$T_{\infty}(z) = T_{\infty,0} + \delta \cdot z \quad 0 \leq z \leq L + L_{ch}$$

بنابراین، دمای متوسط سیال در داخل مخزن برابر است با:

$$T_{\infty,ave} = \frac{1}{L + L_{ch}} \int_0^{L+L_{ch}} T_{\infty}(z) dz = \frac{1}{L + L_{ch}} \int_0^{L-L_{ch}} (T_{\infty,0} + \delta \cdot z) dz = T_{\infty,0} + \frac{1}{2} \delta (L + L_{ch}) \quad (12)$$

با جایگزین کردن (۹) در (۱۱) خواهیم داشت:

$$\rho(z) = \rho \left[1 + \beta (T_{\infty,ave} - T_{\infty,0} - \frac{Q}{\dot{m} c_p} \frac{z}{L}) \right] \quad (13)$$

$$\dot{m}^{0.18} = 5.44 \rho^2 \beta g$$

$$\left[1 - \beta \frac{q'' WL}{\dot{m} c_p} \left(\frac{L + 2L_{ch}}{L + L_{ch}} \right) + \frac{1}{2} \beta \delta (L + L_{ch}) \right] \left[\frac{De^{1.2} A^{1.8}}{\mu^{0.2}} \right] \left[\frac{2q'' WL}{\dot{m} c_p} \left(\frac{L + 2L_{ch}}{L + L_{ch}} \right) - \delta (L + L_{ch}) \right] \quad (20)$$

۶- توزیع شار حرارتی تولید شده در صفحات سوخت به صورت یکنواخت فرض شده است.

خطای وارد در محاسبه \dot{m} ، در مقایسه بین مدلی با توزیع شار واقعی و مدل حاضر، که با توزیع شار یکنواخت است، کوچک و از مرتبه ۵٪ می‌باشد [۵].

۳- نتیجه‌گیری و بحث

مطالعاتی که در باره رآکتور تحقیقاتی تهران انجام می‌گیرد بر مبنای داده‌های مربوط به آن می‌باشد، این داده‌ها عبارتند از: طول خروجی ستون " L_{ch} " که تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر جریان سیال با جابجایی طبیعی دارد، پارامترهای گرمایی (ترموهیدرولیکی) شامل \dot{m} ، q'' و λ و مشخصه‌های گرما-فیزیکی سیال در 20°C و ابعاد کانال، که مقادیر ثابتی به شرح زیر دارند [۶]:

$$A = 1/62 \times 10^{-2} \quad \text{m}^2$$

$$D_e = 5/17 \times 10^{-2} \quad \text{m}$$

$$W = 0/06 \quad \text{m}$$

$$L = 0/615 \quad \text{m}$$

$$s = 0/0027 \quad \text{m}$$

$$\rho = 1000 \quad \text{kg/m}^3$$

$$\beta = 0/18 \times 10^{-2} \quad \text{K}^{-1}$$

$$c_p = 4187 \quad \text{j/kg K}$$

$$\mu = 9/8 \times 10^{-2} \quad \text{kg/m.s}$$

پارامترهای متغیر نیز وقتی که مقدار مشخصی به آنها داده شده است عبارتند از:

$$L_{ch} = 0/0615 \quad \text{m}$$

$$q'' = 1694 \quad \text{W/m}^2$$

این شار حرارتی بر مبنای توان ۵۰ کیلووات و وجود ۴۰۰ تیغه سوخت بدست آمده است. در شرایطی که ابعاد مخزن محدود است و مبدل حرارتی هم برای انتقال حرارت از سیال به بیرون وجود ندارد، حرارت در محیط خود سیال انتقال می‌یابد و این محیط به تدریج به صورت لایه‌هایی با دماهای متفاوت در می‌آید به طوری که در لایه‌های بالایی، درجه حرارت بیشتر و در لایه‌های پایینی

پارامتر بدون بعد λ را می‌توان به عنوان پارامتر لایه‌ای شدن، به صورت زیر تعریف کرد:

$$\lambda = \frac{\delta(L + L_{ch})}{\dot{m} c_p} \quad 0 \leq \lambda \leq 1 \quad (21)$$

و یا:

$$\lambda = \frac{\delta \dot{m} c_p (L + L_{ch})}{2q'' WL} \quad (22)$$

با استفاده از این تعریف، معادله انتقال جرم به صورت نهایی زیر بدست می‌آید:

$$\dot{m}^{0.18} = 10.88g \frac{\rho^2 \beta q'' WL}{\dot{m} c_p} \left[1 - \frac{\beta q'' WL}{\dot{m} c_p} \left(\frac{L + 2L_{ch}}{L + L_{ch}} - \lambda \right) \right] \left[\frac{De^{1.2} A^{1.8}}{\mu^{0.2}} \right] \quad (23)$$

برای بدست آوردن این معادله از مفروضات زیر استفاده شده است:
۱- افزایش دمای سیال درون مخزن، ناشی از لایه‌ای شدن آن، خطی است.

۲- از اثر دنباله ستون (plume) در بالای کانال، چشم پوشی شده است

۳- سرعت سیال در خارج از کانال (یعنی در داخل مخزن) ناچیز گرفته شده است

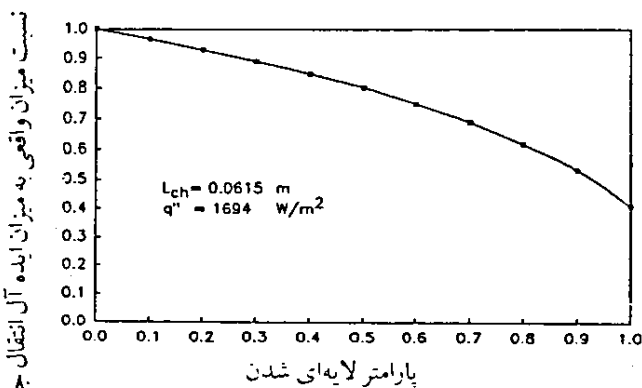
۴- تغییرات چگالی سیال نسبت به دما به صورت خطی در نظر گرفته شده است (تقریب Bossinesq). از تغییر سایر خواص سیال نسبت به تغییر دما، صرف نظر شده است

۵- از افت فشارهای موضعی سیال در ورودی و خروجی کانال صرف نظر شده است

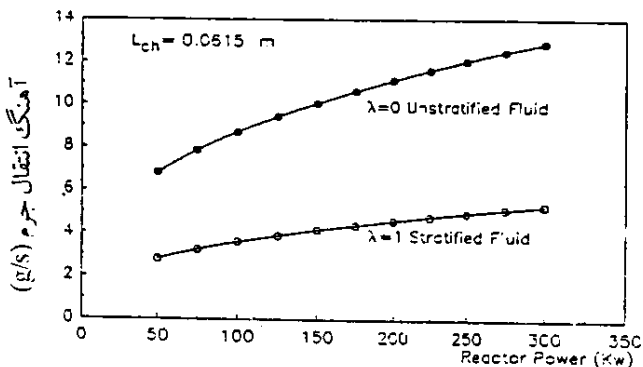
شود، به موازات افزایش آن، بین مراکز حرارتی سیال داخلی کانال و سیال محیط اختلاف سطح تراز ایجاد می شود که نیروی شناوری را به وجود می آورد. این نیرو باعث حرکت سیال با میزان انتقال جرم فزاینده ای می شود برای توجیه این موضوع اگر در معادله (۲۳) تنها عاملهای مؤثر L و L_{ch} و \dot{m} را نگهداریم، در شرایطی که \dot{m} برابر یک است این معادله در تقریب اول به صورت زیر در می آید:

$$\dot{m}^{0.18} = A \frac{L_{ch}}{L+L_{ch}} \left(1 - C \frac{L_{ch}}{L+L_{ch}} \right) \quad (24)$$

که در آن A و C مقادیر ثابت هستند. ملاحظه می شود که وقتی L_{ch} کوچک باشد داخل پرانتز به «یک» نزدیک است، یعنی در حدود مقادیر کوچک L_{ch} ، میزان انتقال جرم رشد بیشتری دارد (و در نتیجه شیب منحنی در آن نواحی زیاد است). اما هنگامی که L_{ch} دارای مقادیر بزرگتر می شود داخل پرانتز کوچک می گردد و در نتیجه منحنی رشد انتقال جرم شیب کمتری پیدا می کند (شکل ۳).



شکل ۱. اثر لایه ای شدن بر نسبت انتقال جرم



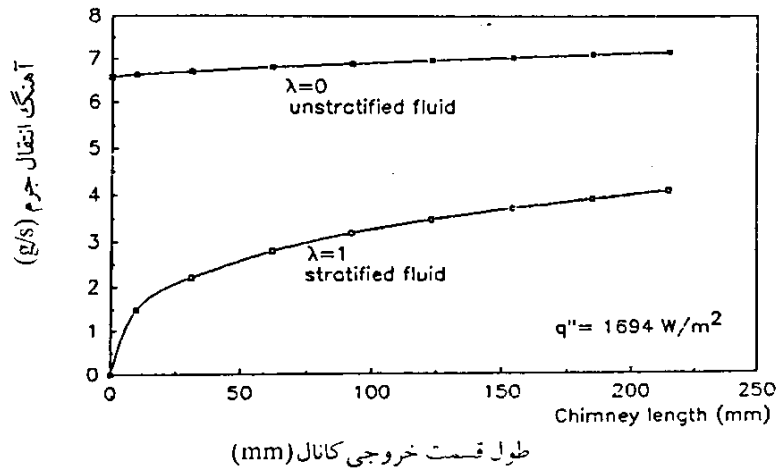
شکل ۲. اثر توان رآکتور بر سرعت انتقال جرم

کمتر است. ایجاد این لایه ها باعث کندی انتقال حرارت و کاهش میزان انتقال سیال می شود، بدانسان که با افزایش پارامتر لایه ای شدن، آهننگ انتقال جرم به طور غیر خطی کاهش می یابد. در شرایطی که سیال کاملاً لایه ای شده باشد میزان انتقال جرم کم می شود ولی صفر نخواهد شد.

نمودار شکل (۱) چگونگی تغییرات نسبت میزان واقعی به میزان ایده آل انتقال جرم سیال را برحسب پارامتر لایه ای شدن نشان می دهد. به طوری که ملاحظه می شود، در حالتی که لایه ای شدن کامل شده باشد این نسبت در حد ۴۱ درصد است.

نمودار شکل (۲) تاثیر افزایش توان رآکتور را بر انتقال جرم سیال در داخل کانال عمودی گرم نشان می دهد. ملاحظه می شود که در هر دو حالت مخزن غیر لایه ای و لایه ای با افزایش توان، میزان انتقال جرم سیال افزایش می یابد اما نرخ افزایش در مخزن غیر لایه ای بیشتر است زیرا، حرارت در این حالت به سرعت منتقل می شود و اختلاف دمای زیادی که به وجود می آید امکان گردش طبیعی بیشتری برای سیال فراهم می آورد. اما در حالت لایه ای شدن کامل ($\lambda=1$)، نه تنها آهننگ انتقال جرم به مقدار قابل ملاحظه ای کم می شود بلکه نرخ افزایش آن در برابر افزایش قدرت نیز کمتر است. مطالعات و تحقیقات انجام شده در رآکتور مشابه رآکتور تحقیقاتی تهران، در آرژانتین و در شرایط حرکت سیال با همرفت طبیعی نشان می دهد که این رآکتور می تواند تا حدود توان ۳۰۰ کیلووات با حفظ حاشیه ایمنی کار کند [۷]. لذا محدوده تغییرات توان در نمودار شکل (۲) تا حد ۳۰۰ کیلووات در نظر گرفته شده است.

شکل (۳) به وضوح اثر طول خروجی کانال را بر انتقال جرم نشان می دهد. وقتی که مخزن در شرایط غیر لایه ای است و حرارت خود رابی درنگ به محیط یا به مبدل حرارتی منتقل می کند، سرعت انتقال جرم سیال زیاد است و حتی وقتی خروجی کانال وجود ندارد باز هم انتقال جرم وجود دارد. اما در شرایط کاملاً لایه ای شده ($\lambda=1$)، اگر طول قسمت خروجی کانال صفر باشد، جریان همرفتی وجود ندارد ($\dot{m}_{in}^0 = 0$) زیرا مرکز حرارتی قلب رآکتور با مرکز حرارتی سیال محیط در یک سطح تراز قرار می گیرند. اما اگر طول اضافی برای قسمت خروجی کانال منظور



شکل ۳. اثر طول قسمت خروجی کانال بر انتقال جرم

1. Y.Zvirin, P.R.Jeuck, C.W.Sullivanard, R.B.Duffey, Experimental and Analytical Investigation of a Natural Circulation System with parallel Loops, 1981.
 2. M.Ishii, I.Kataoka, Scaling Laws for Thermal - Hydraulic System Under Single Phase and Two -Phase Natural Circulation, Nuclear Engineering and Design, Vol 81, 411-425, 1984.
 3. A.Bejan, Convection heat transfer, Wiley, 1984.
 4. N.Todreas, M. Kazimi; Nuclear systems: Vol. II, 1990.
 5. Y. Zvirin, A. Shitzer, and G. Grossman, The natural circulation solar heat models with linear & non - linear temperature distribution. Int. J. Heat Mass Transfer, 20, 1977.
 6. "Safety Analysis Report", Tehran nuclear center, Research Reactor, Tehran, IRAN, 1966.
 7. "Safety Analysis Report", Nuclear research center, Atomic Energy Organization of Iran, July 1997.
- ۸- صمد خا کشورنیا، ابوالقاسم زارع شهنه: بررسی جریان سیال با جابجایی طبیعی در کانال عمودی گرم، بخش مهندسی رآکتور، سازمان انرژی اتمی ایران، دی ۱۳۷۵.

Effect of thermal stratification of coolant in a vertical heated channel

Khakshoornia S. , Zare Shahneh A.

Atomic Energy organization of Iran, 1998

Abstract

In a vessel type low power research reactor with vertical fuel plates, if circulating pump is switched off , the coolant should flow by natural circulation. By using Conservation equations and considering some assumptions, coolant mass flow rate through the channel can be obtained.

In a closed (volume limited) and isolated vessel, gradually, thermal stratification effect is occurred, therefore mass flow rate through the channel decreases.

This study shows that by assuming of linear thermal stratification, mass flow rate versus stratification parameter behaves non - linear and decreases down to 41%.