سومین کنفرانس سوخت و احتراق ایران
تهران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - اسفند ماه ۱۳۸۸
انجمن احتراق ایران
دانشگاه صنعتی امیرکبیر
دانشکده مهندسی هوافضا
FCCI2010-1167

مدلسازی انتقال حرارت محفظه و لوله تخلیه یک محفظه احتراق ضربانی

سیاوش کلاهدوزیان[۱]، حمید ممهدی هروی[۲]، جواد ابوالفضلی اصفهانی[۳]
دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی مشهد
Siavash_Kolahdoozian@yahoo.com

چکیده

احتراق ضربانی یک فرآیند ناپایدار می‌باشد که در آن فشار، دما، سرعت و کسرهای جرمی سوخت و هوا رفتاری نوسانی دارند به همین علت محفظه‌های احتراق ضربانی اخیرا به دلیل انتشار آلودگی کم، نرخ انتقال حرارت بالا و بازدهی بالای احتراق مورد توجه قرار گرفته است. نوسان بالای جریان، میزان انتقال حرارت در لوله تخلیه را بشدت افزایش می دهد. در این مقاله به بررسی محفظه های احتراق ضربانی از نوع هلمهولتز پرداخته شده و انتقال حرارت در آنها بوسیله CFD مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که با افزایش فرکانس و عدد رینولدز مقدار عدد ناسلت و میزان انتقال حرارت افزایش می یابد، با افزایش فاصله از قسمت ورودی تا انتهای لوله تخلیه میزان سرعت نوسانی افزایش می یابد در حالیکه مقدار فشار نوسانی کم می شود. همچنین با افزایش فرکانس و فشار محفظه احتراق میزان انتقال حرارت و عدد ناسلت افزایش می یابد بطوریکه در محفظه های احتراق ضربانی میتوان مقدار عدد ناسلت را در شرایط مشابه با احتراق پایدار تا 3 برابر افزایش داد. نتایج شبیه سازی با روشهای آزمایشگاهی توافق خوبی را نشان می دهند.

واژه‌های کلیدی: احتراق ضربانی- فرآیند ناپایدار- انتقال حرارت در لوله تخلیه- عدد ناسلت

۱- مقدمه

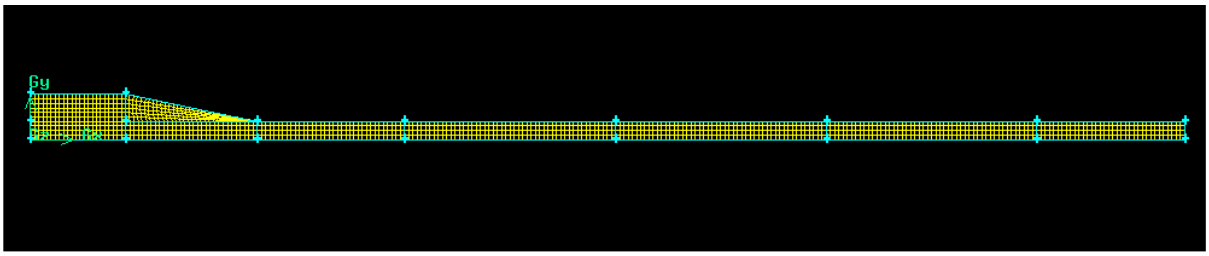
اولین توجهات به احتراق ضربانی به حدود سال 1800 باز می‌گردد. در سال1877 نخستین بار Higges پدیده نوسانات رانش احتراقی را در زمینه سرعت در احتراق ضربانی مشاهده کرد. یک شعله هیدروژن در داخل لوله عمودی قرار داد و تولید صدای وزوز را مشاهده کرد و آن را شعله آوازی نامید. اولین محفظه احتراق ضربانی در سال 1906 در فرانسه ساخته شد و به عنوان ژنراتور گازی برای راه‌اندازی یک توربین نیروگاهی مورد استفاده قرار گرفت. اولین کاربرد وسیع محفظه احتراق ضربانی استفاده از نیروی پیش رانش بود که در سال1941 آلمان‌ها از موتور ضربانی برای راه‌اندازی هواپیمای بمب‌افکن V-1 استفاده کردند[1]. سیستمهای احتراق ضربانی دارای مزایای بسیاری نسبت به سایر انواع محفظه های احتراق می باشند. مزایایی همچون بازده حرارتی 95% یا بیشتر، میزان آلودگی (NOx , CO) پایینتر و نرخ انتقال حرارت بسیار بالاتر در لوله تخلیه، با این وجود محفظه های احتراق ضربانی کاربردهای چندانی ندارند زیرا میزان اطلاعات در مورد انتقال حرارت و نحوه دقیق عملکرد آنها کم و بیشتر اطلاعات موجود نیز بر پایه سعی و خطا می باشد[2,3]. بهترین روش برای بیان نحوه عملکرد و میزان انتقال حرارت این محفظه ها مدلسازی و یا ساخت آنها می باشد[4]. احتراق نوسانی هنگامی رخ میدهد که سوخت و اکسید کننده بطور شیمیایی در حضور امواج صوتی واکنش دهند، اگر چه سوخت و اکسید کننده عموما بطور ممتد و پیوسته وارد محفظه می شوند اما احتراق پیوسته نیست[5]. میزان بالای انتقال حرارت در لوله تخلیه محفظه های احتراق ضربانی نتیجه نرخ بالای جریانهای نوسانی در حضور امواج صوتی می باشند. نرخ انتقال حرارت در لوله تخلیه محفظه احتراق ضربانی می تواند از حدود 70٪ کمتر[4] تا 240٪ بیشتر[6] از نرخ انتقال حرارت در محفظه های مشابه با جریان پایدار و در عددهای رینولدز برابر

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک(تبدیل انرژی) دانشگاه آزاد اسلامی مشهد
۲- استادیار بخش مکانیک دانشکده مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی مشهد
۳- دانشیار بخش مکانیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

باشد، همچنین ضریب انتقال حرارت نیز تا 5 برابر بیشتر از حالت جریان پایدار می باشد [7,8,9]. دراین تحقیق تاثیر پارامترهای مختلفی از قبیل فرکانس، سرعت، فشار محفظه احتراق و عدد رینولدز بر روی عدد ناسلت و انتقال حرارت بررسی می شود. در نهایت برای صحه گذاری نتایج شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی keller مقایسه شده اند.

۲- هندسه و ابعاد محفظه احتراق

در این تحقیق محفظه احتراق ضربانی انتخاب شده از نوع هلمهولتز می باشد تا بتوان نتایج حاصل را با نتایج سایر محققین مقایسه نمود. در ابتدا هندسه مدل توسط نرم افزار GAMBIT کشیده شده است، برای کاهش زمان حل و همچنین به علت وجود تقارن در محفظه، نیمی از محفظه رسم شده و در نهایت با استفاده از محور تقارن در محاسبات کامل در نظر گرفته شده است.



شکل۱- شکل و مش بندی محفظه احتراق

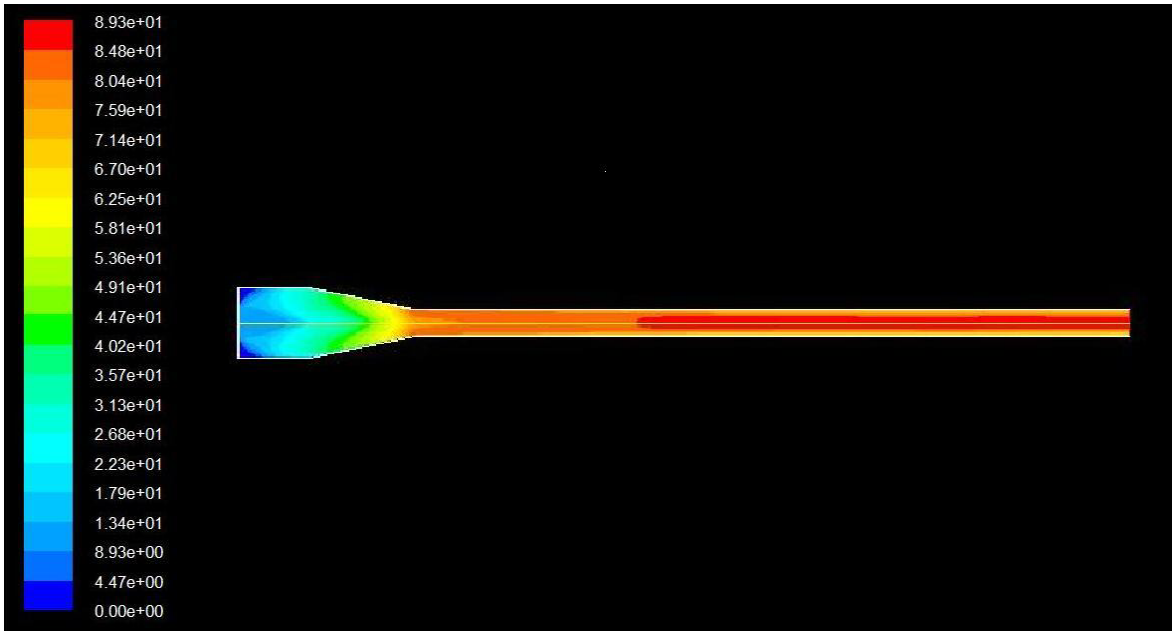
محفظه شامل 3 قسمت اصلی می باشد که شامل ، محفظه احتراق ، مقطع انقباضی و لوله تخلیه می باشد. محفظه احتراق دارای مقطع دایره ای به قطر 85mm و طول 90mm می باشد که سوخت و هوا بصورت پیش آمیخته از ورودی به قطر 34mm که در مرکز آن قرار دارد وارد محفظه احتراق می شوند. مقطع انقباضی دارای قطر اولیه 85mm و قطر انتهایی 34mm همچنین طول 125mm می باشد که رابط بین محفظه احتراق لوله تخلیه می باشد. لوله تخلیه دارای سطح مقطع دایره ای به قطر 34mm و طول 880mm می باشد.

۳- شبیه سازی

مدلسازی توسط نرم افزار FLUENT و بصورت دو بعدی صورت گرفته است، برای شبیه سازی اغتشاش از مدل k-ε استفاده شده است، حالت حل بصورت غیر پایدار و زمان هر سیکل احتراق 24ms در نظر گرفته شده است اما برای ایجاد احتراق ضربانی کد جدیدی برای ورودی ها توسط زبان برنامه نویسی C نوشته شده و با استفاده از امکان User Defind Function به نرم افزار FLUENT متصل شده است تا بتوان بوسیله آن ورودیها را بصورت سینوسی وارد نمود. شبیه سازی برای گاز پروپان و در حالت استیکیومتریک انجام گرفته است.

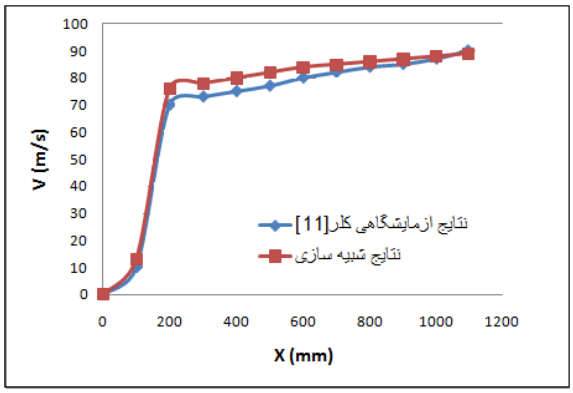
۴- نتایج و بحث

در احتراق ضربانی به علت ماهیت احتراق، سرعت و فشار دارای نوسان می باشند. بنابر این مقدار سرعت و فشار هر دو دارای دو قسمت متوسط و نوسانی هستند، سرعت نوسانی در محفظه های احتراق ضربانی می تواند بین صفر (حالت احتراق پایدار) در ابتدای ورود به محفظه احتراق تا بیش از 5 برابر سرعت متوسط در محدوده فرکانسهای بین 67-101 Hz تغییر نمایدکه این مساله در شکل 2 نشان داده شده است[10].



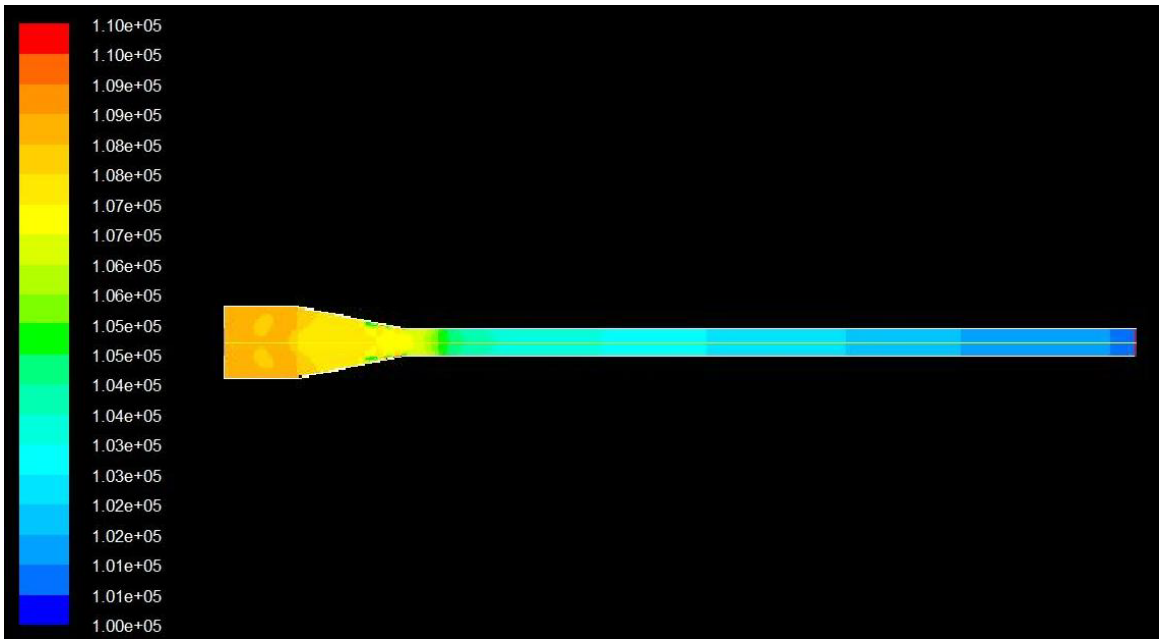
شکل۲- کانتور تغییرات سرعت نوسانی در طول محفظه احتراق

تغییرات سرعت نوسانی برحسب فاصله از ورودی در شکل 3 رسم شده است، نتایج شبیه سازی بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی keller مقایسه شده است که نتایج دارای تطابق خوبی می باشند. همانگونه که در نمودار مشخص است سرعت نوسانی با افزایش فاصله از نقطه ورودی افزایش می یابد، بطوریکه تا ابتدای لوله تخلیه دارای نرخ تغییرات سرعت زیاد و سپس در طول لوله تخلیه دارای نرخ افزایشی کمتری می باشد، این تغییرات به علت تغییر سطح مقطع بین محفظه احتراق و لوله تخلیه می باشد[11] .



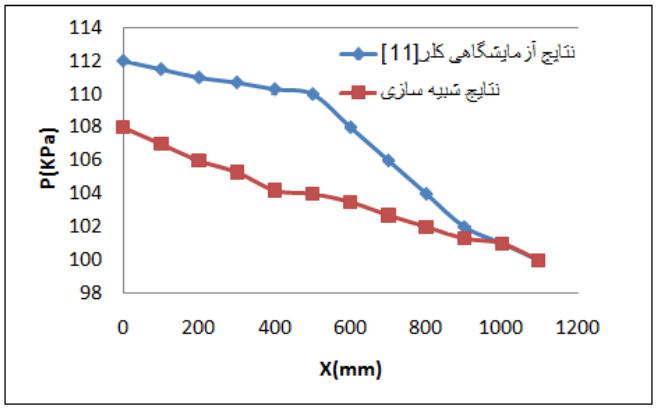
شکل ۳- تغییرات سرعت نوسانی در طول محفظه احتراق

میزان فشار نوسانی در طول محفظه احتراق با افزایش فاصله از قسمت ورودی کاهش می یابد، این مساله در شکل 4 نشان داده شده است.



شکل۴- کانتور تغییرات فشار نوسانی در طول محفظه احتراق

میزان فشار نوسانی در ابتدای محفظه احتراق بیشترین مقدار خود را داراست که با افزایش فاصله از ورودی این میزان کاهش می یابد تا سرانجام در انتهای لوله تخلیه به کمترین مقدار خود یعنی صفر می رسد، در این حالت فشار خروجی برابر فشار اتمسفر می باشد. در شکل 5 تغییرات فشار نوسانی برحسب تغییر فاصله از ورودی رسم شده است، این تغییرات نیز به علت تغییر سطح مقطع بین محفظه احتراق و لوله تخلیه می باشد [11].



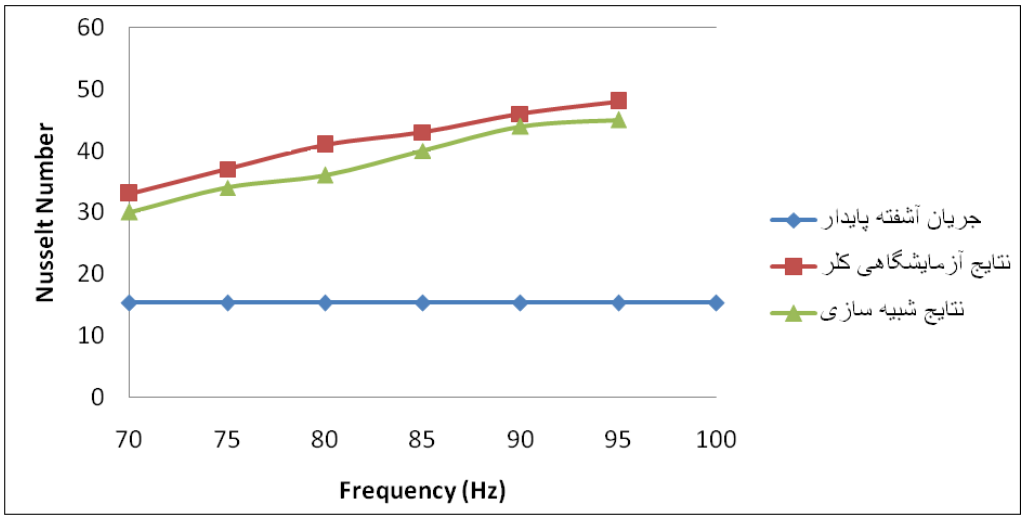
شکل۵- تغییرات فشار نوسانی در طول محفظه احتراق

نتایج نشان میدهد با افزایش فرکانس مقدار عدد ناسلت افزایش می یابد. برای بدست آوردن عدد ناسلت از فرمول زیر استفاده می کنیم.

$$Nu = 0.028\,\mathrm{Re}^{3/4}\left(1+0.21\frac{u}{U}\left(1+7.36\frac{(w-w_0)D}{U}\right)\right)^{3/4} \qquad (۱)$$

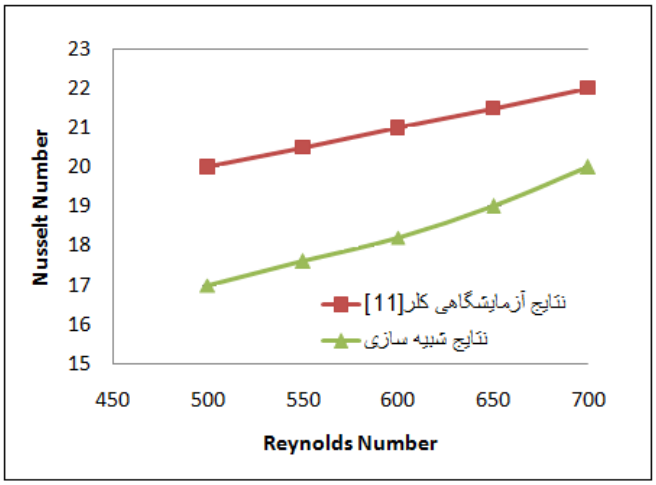
که در آن U سرعت متوسط، u سرعت نوسانی، w فرکانس ورودی و D قطر لوله تخلیه می باشد[12].

شکل 6 تغییرات عدد ناسلت با مقدار فرکانس را نشان می دهد، مقدار عدد ناسلت برای احتراق ضربانی در محدوده رینولدز 3700-3900 و برای فرکانسهای 70-95Hz با توجه به نتایج شبیه سازی رسم شده است. برای مقایسه عدد ناسلت بین احتراق ضربانی و احتراق پایدر در شرایط کارکرد مشابه (Re=3850) نمودار مقدار عدد ناسلت در احتراق پایدار(مقدار فرکانس در احتراق پایدار صفر می باشد) که مقداری ثابت و برابر 15.3 می باشد نیز رسم شده است. این نمودارها نشان می دهند که مقدار عدد ناسلت در احتراق ضربانی می تواند تا 3 برابر احتراق پایدار افزایش داشته باشد که این به معنای انتقال حرارت بیشتر در این نوع احتراق می باشد [13] .



شکل۶- تغییرات عدد ناسلت با فرکانس

در شکل۷ مقدار تغییرات عدد ناسلت با عدد رینولدز رسم شده است که نشان می دهد با افزایش عدد رینولدز مقدار عدد ناسلت افزایش می یابد ، نتایج در فرکانس ثابت 83 Hz و فشار محفظه 5 Kpa بیان شده است [12,11] .



شکل ۷- تغییرات عدد ناسلت با عدد رینولدز

۵- نتیجه گیری کلی

پس از شبیه سازی های انجام شده برای یک محفظه احتراق ضربانی از نوع هلمهولتز نتایج کلی زیر بدست آمده است:

- دما با انجام احتراق شروع به بالا رفتن می کند، با انتقال حرارت، میانگین دما کاهش می یابد بطوریکه در انتهای لوله تخلیه کمترین میانگین دما بدست می آید.
- نتایج نشان می دهد که افزایش ضریب انتقال حرارت باعث کاهش دامنه نوسانات و فرکانس آنها می شود.
- با افزایش فرکانس و عدد رینولدز مقدار عدد ناسلت نیز افزایش می یابد.
- با دور شدن از ورودی میزان نوسانات سرعت افزایش می یابد در حالیکه مقدار نوسانات فشار کم می شود.
- با افزایش فرکانس و فشار محفظه احتراق در محفظه های احتراق ضربانی میتوان مقدار عدد ناسلت را در شرایط مشابه با احتراق پایدار تا 3 برابر افزایش داد.

با توجه به نتایج بدست آمده می توان بیان کرد که استفاده از محفظه های احتراق ضربانی در شرایط کارکرد مشابه با سایر انواع محفظه های احتراق دارای مزایا و بازدهی بیشتری می باشد.

مراجع:

1- Zinn,B. T., Pulse Combustion, The World and I, pp 304-311, 1991.
2- Zinn,B. T., State of the Art and Research Needs of Pulsating combustion, ASME Paper 84-WA/NCA-19 ASME Winter Annual Meeting,New Orleans,LA, December, 1984
3- putnam ,A. A., Belles, F. E., and Kentfield, J. A. C. Pulse Combustion, Prog. Energy Combus. Sci.,12 pp.43-79, 1986.
4- Alhaddad, A. A. and Coulman, G. A. Experimental and theorical Study of Heat Transfer in Pulse Combustion Heaters, procceding vol, I: symposium on Pulse Combustion Applications,GRI-82/0009.2,Atlanta,GA,Mar, 1982.
۵- آذرین فر، ا .، "مدل سازی یک بعدی محفظه احتراق ضربانی و محاسبه مواد آلاینده"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (تبدیل انرژی)، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد، ۱۳۸۶.
6- Handby, V. I. Convective Heat Transfer in a Gas-Fired Pulsating Combustor, ASME j. of Engr, for power, 91, pp, 48-52, 1969

7- Galitseyskiy , B. M. and Ryzhov, Yu. A. Heat Transfer in Turbulent Gas Flows in the Case of High-Frequency Pressure Fluctuations, Heat Transfer – Soviet Research, 9, No. 4, July – Aug., 1977.
8- B.S. Petukhov, V.N.N. Popov, Theoretical calculation of heat exchange and frictional resistance in turbulent flow in tubes of incompressible fluid with variable physical prop, 1996.
9- Jeff Daycock , Enviromental Aspects of Pulse Combustion , university of wales Cardiff , Report No 2170 , 1996.
10- Dec, J. E.,Keller, J. O., and Hongo, I,Time– Resolved Velocities and Turbulence in the Oscillaiting Flow of a Pulse combustor Tailpipe, combustion and flame,83:271-292 , 191 .
11- Dec, J. E.,Keller, J. O., Pulse combustor Tailpipe Heat Transfer Dependence on Frequency, Amplitude, and Mean FlowRate,combustion and flame,77:359-374, 1989.
12- J.E .DEK , J. O. KELLER , V.S.ARPACI, Heat Transfer in Pulse Combustor Tailpipe , Combust.Sci and Tech, Vol 94 ,pp 131-146 , 1993 .
13- R.S.GEMMEN , J. O. KELLER , V.S.ARPACI, Heat/Mass Transfer from a cylinderb in the strongly Oscillating Flow of a Pulse Combustor Tailpipe , Combust.Sci and Tech , Vol 94 pp 103-130, 1993.
14- W.U Zhonghua, Basics of Pulse Combustion Technology, 2006.