Tr. J. of Engineering and Environmental Sciences
21 (1997) 389-398
© TÜBİTAK

Boru İçerisinde Pulzasyonlu Türbülanslı Akışta Isı Transferi

Orhan BÜYÜKALACA
Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Adana-TÜRKİYE

Geliş Tarihi: 13 / 6 / 1996

Özet: Bu deneysel çalışmada, uniform olarak ısıtılmış düşey bir boru içerisinden geçen suya uygulanan pulzasyonların ısı transferi üzerine etkileri araştırılmıştır. Uygulanan pulzasyonların ortalama Reynolds sayısı 18700, göreceli genliği 0.33 ve periyodu 10 ile 200 s arasındadır. Karşılaştırma yapabilmek için ayrıca bir gurup sürekli akış deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Pulzasyonlu akışta elde edilen ısı transferi katsayısının sanki-sürekli akışta elde edilen ısı transferi katsayısını belirli bir faz ve genlik farkı ile takip ettiği, çevrim boyunca ortalama ısı transferi katsayıları dikkate alındığında ise uygulanan pulzasyonların dikkate değer bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: ısı transferi, konveksiyon, pulzasyonlu akış, türbülanslı akış

Heat Transfer in Pulsating Turbulent Pipe Flow

Abstract: In this experimental study, influences on heat transfer of flow transients imposed on water flowing through in a uniformly heated pipe were investigated. Mean Reynolds number of the imposed flow transients was 18700, relative amplitude was 0.33 and period was varied between 10 and 200 seconds. In addition, a series of steady flow experiments were also performed. It was found that heat transfer coefficient in pulsating flow follows that of pseudo-steady flow with an amplitude and phase-lag. However, when the average heat transfer coefficient on a cycle is considered it was found that pulsating had no considereble influence over pseudo-steady heat transfer coefficient.

Key Words: heat transfer, convection, pulsating flow, turbulent flow

Giriş

Kanallarda ısı transferini belirleyen parametrelerin sürekli (zamanla değişmeyen) olması durumunda zorlanmış konveksiyonla ısı transferi detaylı olarak incelenmiştir. Ancak bazı ısı transferi problemlerinde ısı transferini belirleyen parametrelerin biri veya birden fazlası sabit olmayıp zamanın fonksiyonu olarak değişebilmektedir. Bu durumda problem "sürekli olmayan" veya "geçici rejim" de ısı transferi olarak adlandırılır. Pratikte genellikle, ısı akım şiddetinin zamanla değişmesi, kanal girişinde akışkan sıcaklığının zamanla değişmesi ve akış debisinin zamanla değişmesi durumları görülebilir.

Bu çalışmada, gerek bazı ısı transferi problemlerinde karşılaşılması, gerekse ısı transferi katsayısını arttırıcı bir yöntem olarak düşünülen, akış debisinin zaman ile, ortalama bir değer etrafında, sabit bir genlik ile sinusoidal bir şekilde değişmesi durumunda ısı transferi incelenmiştir. Bu tür bir akış pulzasyonlu akış olarak adlandırılabilir.

Sürekli rejim durumunda, türbülanslı tam gelişmiş akışta, boyutsuz ısı transferi katsayısı Nusselt sayısının (Nu), Reynolds sayısının (Re) ve Prandtl sayısının (Pr) fonksiyonu olduğu belirlenerek $Nu=f_1(Re,Pr)$ şeklinde birçok eşitlik çıkarılmıştır. Akış debisinin sabit olmayıp, zamanla sinusoidal bir şekilde değişmesi durumunda yapılan çalışmalar ise, bu parametrelere ilaveten uygulanan pulzasyonun frekansı f'nin (veya açısal frekansı ω) ve genliği A'nın da ısı transferi katsayısını etkilediğini ortaya koymuştur. Bu durumda $Nu=f_2(Re,Pr,f,A)$ olmaktadır.

Pulzasyonlu akışta hız ve türbülans yapısı Mizushina ve arkadaşları (1973, 1975), Ramaprian ve Tu (1983) ve Jackson ve He (1994) tarafından deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışmalar, akışın ortalama Reynolds sayısının ve frekansın esas belirleyici parametreler olduğunu, genliğin ise ikinci derecede etkili olduğunu ortaya koymuştur.

Pulzasyonlu akışta ısı transferini deneysel olarak inceleyen bazı araştırmacılar, pulzasyonlu akışta ısı trans-

ferinin sürekli akışta görülen ısı transferinden daha iyi olduğunu (West ve Taylor, 1952; Havemann ve ark., 1956; Baird ve ark., 1966; Hanby, 1969; Mameyev ve ark., 1976), bazıları daha kötü olduğunu (Mueller, 1957; Muller, 1967; Park ve ark., 1982; Liao ve Wang, 1988), bazıları ise akışın ortalama Reynolds sayısı, frekansı ve genliğine bağlı olarak aynı, daha iyi veya daha kötü (Havemann ve ark., 1956; Barnett ve Vachon, 1970; Al-Haddad ve Al-Binally, 1989) olabileceğini belirtmişlerdir. Bu çalışmalardan, uygulanan pulzasyonun frekansının belirli bir değerin üzerine çıkması durumunda ısı transferinin sürekli akış durumunda elde edilecek ısı transferinden daha iyi olacağı sonucunu çıkarmak mümkündür. Ancak bu iyileşmenin sınırlarının nereden başladığı ve genlik ve ortalama Reynolds sayısının buna etkisinin ne olduğu tam olarak bilinmemektedir. Bazı araştırmacılar (örneğin, Al-Haddad ve Al-Binally, 1989), genliğin ısı transferi üzerindeki etkisinin ihmal edilebilecek düzeyde olduğunu belirtirken, bazıları da (örneğin, Liao ve Wang, 1988) genliğin artmasıyla ısı transferinin sürekli akış durumuna göre kötüleştiğini bildirmişlerdir.

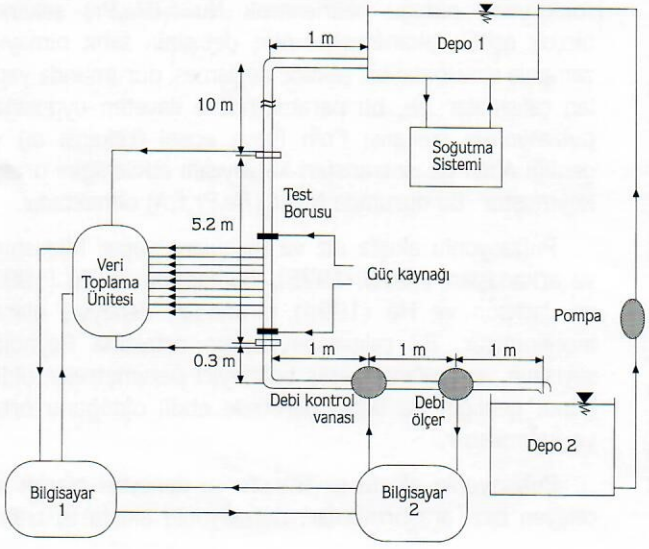
Pulzasyonlu akışta yapılan ısı transferi çalışmalarının sonuçları birbiriyle herzaman uyuşmamakta hatta bazen çatışmaktadır. Literatürde, bu tür akışlarda ısı transferi katsayısını doğrudan etkileyebilecek 3 temel parametrenin ($\overline{Re}$, f ve A) sistemli bir şekilde değiştirilmesiyle yapılmış deneysel çalışmalar mevcut değildir. Bu konuda mevcut verilere bir katkıda bulunabilmek için bu çalışma gerçekleştirilmiştir.

Deney Düzeneği

Deneyler ısıtılmış düşey bir boru içerisinde yapılmıştır. Kullanılan boru 1.65 mm cidar kalınlağındaki paslanmaz çelikten imal edilmiş olup iç çapı 98.3 mm ve toplam uzunluğu 5.2 m dir. Deneyler sabit ısı akım şiddeti ısıl sınır şartı altında gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla borunun merkezi 2.5 m uzunluğundaki kısmı alternatif elektrik akımı yardımıyla ısıtılmış ve dış yüzeyi cam yünü kullanılarak yalıtılmıştır. Deney düzeneği Şekil 1 de şematik olarak gösterilmiştir.

Deneylerde akışkan olarak su kullanılmıştır. Su bir depodan (Depo-1) alınarak test borusundan geçirilmiş, daha sonra da sırasıyla debi kontrol vanası ve debi ölçerden geçirilerek diğer bir depoya (Depo-2) akıtılmıştır. Buradan alınan su bir pompa yardımıyla tekrar Depo-1'e pompalanmıştır. Böylece suyun sistemde kapalı bir çevrim yapması sağlanmıştır. Deneyler süresince suyun test borusuna gireş sıcaklığını sabit tutabilmek için, Depo-1 içerisine bir ısı değiştiricisi yerleştirilmiş ve içerisinden bir soğutma ünitesinde soğutulmuş su dolaştırılmıştır. Isı değiştiricisi içerisinde dolaştırılan soğutma suyunun debisi ayarlanarak, deneylerde kullanılan suyun boru giriş sıcaklığı istenen değerde sabit tutulmuştur. Ayrıca üst depo ile alt depo arasına yerleştirilen bir taşma hattı yardımıyla da deneyler süresince üst depoda su seviyesinin sabit kalması sağlanmıştır.

Pulzasyonlu akış deneylerinde en önemli noktalardan birisi, debinin zamanla planlandığı gibi değiştirilebilmesidir. Bu çalışmada, debiyi zamanla sinusoidal bir şekilde değiştirebilmek için, üzerinde mevcut bir elektronik seviye kontrol devresi tarafından debinin ayarlanabildiği bir vana kullanılmıştır. Kullanılan vanada debi, bir pistonun hareketi ile kontrol edilmektedir. Pistonun hareket miktarı (akışkanın geçtiği kanalın kesit alanını ayarlamakta) ve hareket hızı birbirinden bağımsız olarak değiştirilebilmektedir. Bu ise uygulanan pulzasyonların genliğinin ve frekansının birbirinden bağımsız olarak ayarlanabilmesine imkan tanımaktadır. Pistonun ha-



Şekil 1. Deneylerde kullanılan düzenek.

reketi basınçlı hava yardımıyla, kontrolu ise bir seviye kontrol devresi tarafından gerçekleştirilmiştir. Bir kişisel bilgisayar yardımıyla üretilen sinyaller yardımıyla seviye kontrol devresi kumanda edilmiştir. Ayrıca debi kontrol vanasından sonra yerleştirilen bir türbinmetre yardımıyla da gerçek debi ölçülmüştür. Debi ölçerin ürettiği sinyaller gerekli ara birimlerden geçirilerek bilgisayar tarafından okunmuştur. Yapılan kontrol deneyleri türbinmetrenin uygulanan pulzasyonlardan etkilenmediğini ortaya koymuştur.

Boruya girişte ve çıkışta su sıcaklığı, boru içerisine yerleştirilen ısıl eleman çiftleri yardımıyla ölçülmüştür. Boru dış yüzey sıcaklığının ölçümü için ise ısıl eleman çiftleri yaklaşık her iki çap mesafesinde bir olacak şekilde boru dış yüzeyine kaynatılmıştır. Isıl eleman çiftlerinin ürettikleri elektromotor kuvvetleri çok kanallı bir veri toplama ünitesi tarafından sayısal sinyallere dönüştürülmüş ve bir bilgisayara aktarılmıştır.

Hassas bir voltmetre ve ampermetre kullanılarak borudan geçen elektrik akımı ve boru boyunca meydana gelen voltaj düşümü ölçülmüştür.

Zamanın fonksiyonu olarak ölçülen yerel boru dış yüzey sıcaklığı sürekli bir fonksiyonla temsil edilmiş ve boru cidarında yazılan ısı iletim denkleminin yaklaşık bir metod kullanılarak çözümü ile yerel boru iç cidar sıcaklığı bulunmuştur. Yerel ortalama akışkan sıcaklığı ise ısıtılmış borudan geçen belirli bir hacimdeki akışkan için yazılan enerji dengesi yardımıyla elde edilmiştir. Bu veriler kullanılarak yerel ısı transferi katsayısı hesaplanmıştır.

Deney Parametreleri

Bu çalışmada test borusundan geçen suyun debisi 1.45 kg/s lik (Re=18700) ortalama bir değer etrafında sinusoidal olarak değiştirilmiştir. Uygulanan pulzasyonun genliği 0.485 kg/s (γ=0.333) olacak şekilde sabit tutulmuş periyodu ise deneyden deneye 10 ile 200 s arasında değiştirilmiştir. Toplam 12 değişik periyodda deneyler yapılmıştır. Tüm deneylerde suyun test borusuna giriş sıcaklığı 20±1 °C de (Pr≅7) ve ısı akısı şiddeti 7.77×10^3 W/m^2 de sabit tutulmuştur. Herbir koşul için en az 50 çevrim süresince veri toplanmıştır.

Ayrıca sistemin sürekli akış durumundaki karakteristiklerini belirleyebilmek için 0.97 ile 1.94 kg/s değerleri arasında değişen 10 değişik debide deneyler yapılmıştır.

Deney Sonuçları

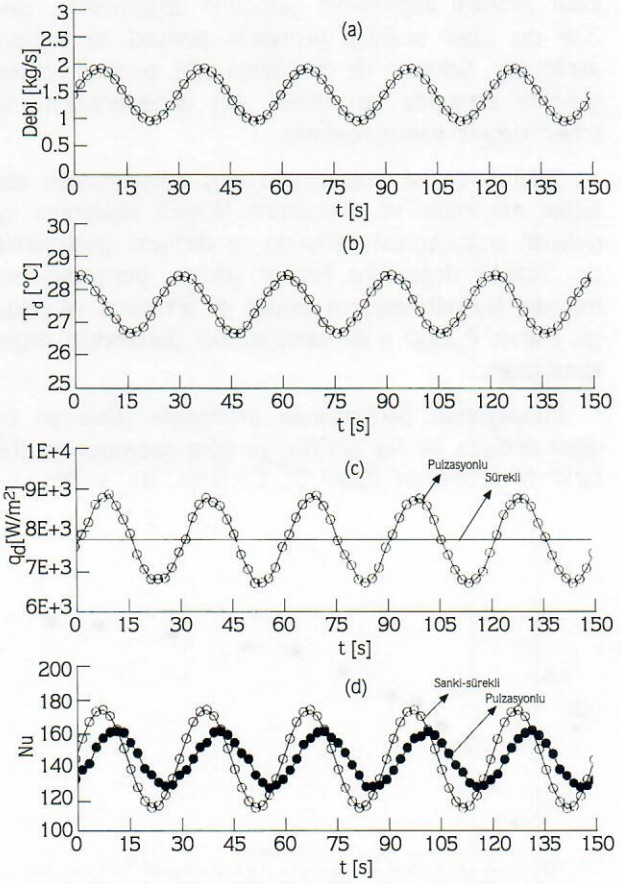
Uygulanan pulzasyonun ısı transferine etkisini ortaya koyabilmek için öncelikle sürekli akış deneyleri ele alınmıştır. Bu deneylerden elde edilen ısı transferi katsayılarının (x/d > 10) olduğu bölgede %3'lük bir hata payı ile

$$Nu_{ss} = 0.96 * Nu_{PK} \quad (1)$$

eşitliği ile temsil edilebileceği görülmüştür. Nu_{PK}, Petukhov ve Kirillov (1958) tarafından zorlanmış konveksiyonda ısı transferi için önerilen eşitliği göstermektedir.

Burada pulzasyonlu akış deneylerine örnek olarak, 30 s periyoda sahip deneylerden elde edilen sonuçlar verilmiştir. Şekil 2(a) da uygulanan akış pulzasyonu gösterilmiştir. Şekil 2(b) de ise x/d=21 eksenel mesafesinde ölçülen dış cidar sıcaklığı verilmiştir. Bu şekilden de görüldüğü gibi cidar sıcaklığı da sinusoidal bir şekilde değişmektedir ve uygulanan akış pulzasyonunu belirli bir gecikme (faz farkı) ile takip etmektedir.

Ölçülen dış cidar sıcaklıkları kullanılarak hesaplanan boru cidarındaki ısı akısı şiddeti Şekil 2(c) de gösterilmiştir. Isı akısı şiddeti de sürekli akış durumunda gö-



Şekil 2. Uygulanan akış pulzasyonunun (a), dış cidar sıcaklığının (b), ısı akım şiddetinin (c) ve Nusselt sayısının (d) zaman ile değişimi.

rülen ısı akısı şiddeti etrafında periyodik bir değişim göstermektedir.

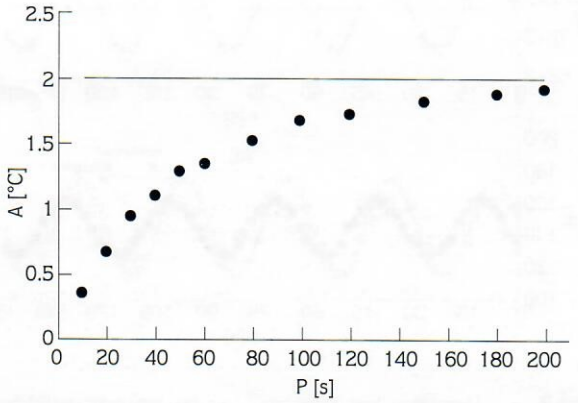
Şekil 2(d) de ise boyutsuz ısı transferi katsayısı Nu_p'nin değişimi verilmiştir. Bu şekilde ayrıca, anlık Reynolds sayıları kullanılarak Eşitlik (1) den elde edilen Nusselt sayıları da gösterilmiştir. Bu şekilde hesaplanan boyutsuz ısı transferi katsayısı "sanki-sürekli" ısı transferi katsıyısı (Nu_{ss}) olarak adlandırılmaktadır. Şekilden görüldüğü gibi pulzasyonlu akışta elde edilen Nusselt sayısı sürekli akışta görülen Nusselt sayısını belirli bir gecikme (faz farkı) ile takip etmektedir. Ayrıca Nu_p'nin genliği Nu_{ss}'in genliğinden daha küçüktür. Nu_p'nin minumum değeri Nu_{ss}'in minumum değerinden daha büyük olurken, maksimum Nusselt sayısı dikkate alındığında tersi bir durum söz konusudur.

Uygulanan akış pulzasyonunun periyodunun değişmesiyle yukarıda verilen sonuçlar geçerliliğini korumakla birlikte sayısal olarak bazı değişimler gözlenmiştir.

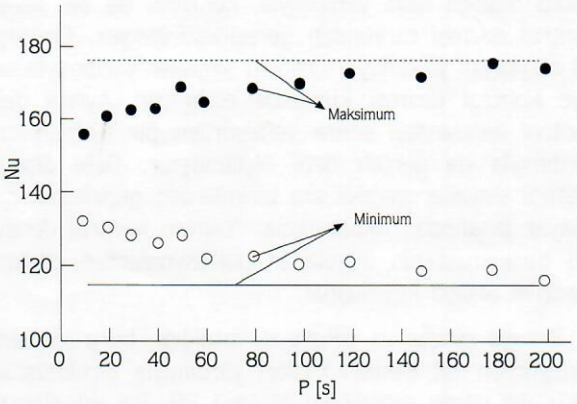
Bunlardan birincisi, periyodun artmasıyla birlikte dış cidar sıcaklığı değişiminin genliğinin değişmesidir. Şekil 3'te dış cidar sıcaklığı genliğinin periyod ile değişimi verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, periyod arttıkca genlikte artmakta ve sürekli akış deneylerinden elde edilen değere yaklaşmaktadır.

Şekil 4 de ise pulzasyonlu akış deneylerinden elde edilen minumum ve maksimum Nusselt sayılarının uygulanan pulzasyonun periyodu ile değişimi gösterilmiştir. Sıcaklık değişimine benzer şekilde, periyodun artmasıyla, Nusselt sayısının genliği de artmakta ve yaklaşık olarak P=200 s de sanki-sürekli durumdaki değeri almaktadır.

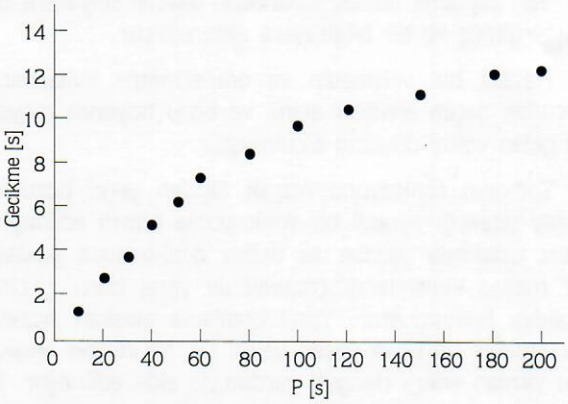
Pulzasyonun periyodunun artmasıyla gözlenen bir diğer değişim ise Nu_p'nin Nu_{ss}'ye göre gecikmesinin (faz farkının) artmasıdır (Şekil 5). Gecikme, Nu_p ve Nu_{ss} nin



Şekil 3. Dış cidar sıcaklığı genliğinin uygulanan pulzasyonların periyodu ile değişimi (Çizgi: sürekli, Sembol: pulzasyonlu).



Şekil 4. Minimum ve maksimum Nusselt sayılarının uygulanan pulzasyonun periyodu ile değişimi (Çizgiler: sanki-sürekli, Semboller: pulzasyonlu).

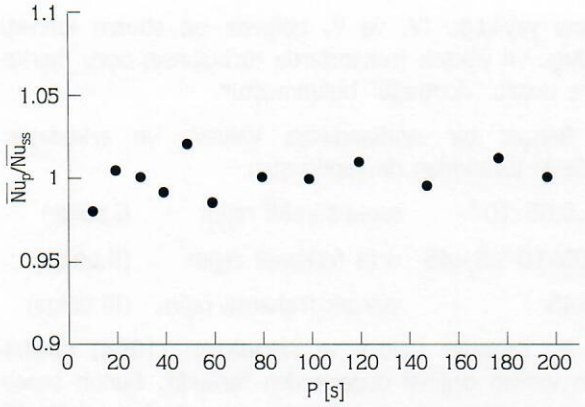


Şekil 5. Pulzasyonlu akışta ısı transferi katsayısının sanki-sürekli akıştaki ısı transferi katsayısına göre gecikmesinin uygulanan pulzasyonların periyodu ile değişimi.

maksimumları arasındaki zaman farkı olarak tanımlanmıştır. Gecikme de periyodla artarak P=200 s civarında sabit 12 s'lik asimptotik bir değere ulaşmaktadır.

Pulzasyonlu akışta ısı transferi katsayısında bir iyileşme veya kötüleşmeden söz edebilmek için bir çevrim boyunca ortalama değerlere ($\overline{Nu}_p$ ve $\overline{Nu}_{ss}$) bakmak gerekir. Pulzasyonlu akışta ısı transferi katsayısı anlık olarak sanki-sürekli durumdan daha düşük veya daha yüksek olabilmekle birlikte bir çevrim boyunca ortalama ısı transferi katsayıları karşılaştırıldığında aralarındaki farkın küçük olduğu görülmektedir (Şekil 6). Bu sebeple, ele alınan parametre sınırları içerisinde uygulanan pulzasyonun $\overline{Nu}_p$'yi arttırıcı veya azaltıcı yönde bir etkisinin olmadığı söylenebilir.

Değişik eksenel mesafelerde $\overline{Nu}_p/\overline{Nu}_{ss}$ oranları hesaplanmış ve 10 dan büyük olması durumunda x/d nin $\overline{Nu}_p/\overline{Nu}_{ss}$ oranına bir etkisinin olmadığı bulunmuştur.



Şekil 6. $\overline{Nu_p}/\overline{Nu_{ss}}$ oranının uygulanan pulzasyonun periyodu ile değişimi.

Benzer sonuç Valueva ve arkadaşlarının (1994) araştırmasında da elde edilmiştir.

Tartışma

Şekil 3 ten de görüldüğü gibi, dış cidar sıcaklığının genliği uygulanan akış pulzasyonu ile değişmektedir. Bu çalışmada yerel akışkan sıcaklığı ölçülmemekle birlikte, akış debisinin zamanla doğrusal olarak değiştirildiği çalışmalardan (Büyükalaca, 1993; Jackson ve ark., 1996) elde edilen sonuçlara göre, yerel akışkan sıcaklığının da zamanla sinusoidal bir şekilde değişmesi ve uygulanan pulzasyonu belirli bir gecikme ile takip etmesi beklenebilir. Dış cidar sıcaklığı da akışkan sıcaklığı değişimini belirli bir gecikme ile takip edecektir. Akışkan sıcaklığı dalgalanmalarının bir bölümü laminer alt tabaka ve boru cidarı tarafından filtre edilerek dış cidara ulaşacaktır. Ancak bu çalışmada ölçülmediği gibi, literatürde de yerel akışkan sıcaklığının ölçüldüğü bir araştırma mevcut olmadığı için yerel akışkan sıcaklığının ve buna bağlı olarak da dış cidar sıcaklığının uygulanan pulzasyondan hangi fiziksel mekanizmalara bağlı olarak etkilendiğini irdelemek güçtür.

Sürekli akışta ısı transferinde, boru içerisinde üretilen ısının tamamı sürekli olarak akışkana geçeceğinden, ısı akım şiddeti (q_d) sabittir. Ancak pulzasyonlu akışta debinin artmasıyla, üretilen ısıya ilave olarak, boru cidarında depo edilen ısının bir kısmı da akışkana geçer ve boru cidar sıcaklığı düşmeye başlar. Bu sebeple belirli bir süre için, ısı akım şiddeti sürekli akışta görülecek değerden daha büyük olur. Debinin azaldığı kısımda ise, tersi bir durum söz konusudur. Boru cidarında üretilen ısının bir miktarı akışkana geçmeyerek, boru cidarında depo edilir. Bu da ısı akım şiddetinin belirli bir süre için sürekli akışta elde edilecek değerden daha düşük olmasına yol açar. Bu durum Şekil 2(c) den açıkca görülmektedir.

Isı transferi katsayısının uygulanan pulzasyondan nasıl etkilendiğini tartışabilmek için akışın hızı ve türbülans yapısını incelemek gerekir.

Pulzasyonlu Akışların Yapısı

Bir pulzasyonlu akışta türbülans yapısının uygulanan pulzasyondan etkilenip etkilenmediğini anlamak için, pulzasyon frekansının türbülansın karakteristik bir frekansı ile etkileşip etkileşmediğine bakmak gereklidir. Bu amaç için türbülansın karakteristik frekansı olarak türbülans "patlama" (bursting) frekansı kullanılabilir (Ramaprian ve Tu, 1983). "Patlama", turbülanslı akışta cidara yakın bölgede meydana gelen bir dizi sanki-periyodik fiziksel olaylar için kullanılan bir terimdir.

Mizushina ve arkadaşları (1973, 1975) hem sürekli hem de pulzasyonlu akışta "patlama" olayını araştırmışlardır. Sürekli akışta yaptıkları deneyler neticesinde "patlama"nın belirli bir frekans aralığında meydana geldiğini ve bu frekansların ortalama bir değer etrafında yoğunlaştığını bulmuşlardır. "Patlama"ların oluşma frekanslarını (ω_b) bir histogram şeklinde ifade ederek, bu histogram yardımıyla en düşük ($\omega_{b,min}$), en yüksek ($\omega_{b,max}$) ve ortalama ($\omega_{b,o}$) açısal frekansları elde etmişler ve bu frekansların sadece Reynolds sayısının bir fonksiyonu olduğunu ortaya koymuşlardır. Mizushina ve arkadaşlarının (1973, 1975) verilerini kullanarak, Ramaprian ve Tu (1983) şu eşitlikleri yazmışlardır:

$$\frac{\omega_{b,min} d}{U_\tau} \approx 166\, Re^{-0.54} \qquad (2)$$

$$\frac{\omega_{b,max} d}{U_\tau} \approx 31\, Re^{0.125}\left[10^{-(3.32-0.667 \log Re)}\right] \qquad (3)$$

$$\frac{\omega_{b,o} d}{U_\tau} \approx 1.58\, Re^{1/8} \qquad (4)$$

Mizushina ve arkadaşlarının (1973, 1975) pulzasyonlu akış ile yaptıkları deneyler neticesinde şu ortaya çıkmıştır: Eğer uygulanan pulzasyonun frekansı ω_b ile çakışıyorsa, (pulzasyon frekansı $\omega_{b,min}$ ile $\omega_{b,max}$ arasında ise) uygulanan pulzasyonun frekansı ω_b yi etkilemekte böylece de akışın türbülans yapısı değişmektedir. Ancak uygulanan pulzasyonun frekansı bu aralığın dışında ise ω_b ve buna bağlı olarak da türbülans yapısı uygulanan pulzasyondan etkilenmemektedir. Bu durumda, $\omega_{b,o}$ pulzasyonlu akışın ortalama Reynolds sayısı ile aynı

Reynolds sayısına sahip sürekli bir akışta görülebilecek değere eşit olmaktadır.

Uygulanan pulzasyonun oluşturduğu kararsızlığın bir çevrim süresinde radyal yönde yayındığı mesafenin bir ölçüsü olarak, laminer pulzasyonlu akışlarda $S=\frac{1}{2}d(\omega/2\nu)^{1/2}$ şeklinde tanımlanan Stokes sayısı kullanılmaktadır. Bu sayı boru yarıçapının, "Stokes tabaka" kalınlığına oranı olarak yorumlanabilir. "Stokes tabaka" ise boru cidar bölgesinde oluşan herhangi bir kararsızlığın bir çevrim süresinde radyal yönde yayındığı bölgedir.

Aynı frekans değerinde, türbülanslı akışta türbülanslı yayınımdan dolayı herhangi bir kararsızlık bir çevrim süresinde, laminer Stokes tabaka kalınlığından çok daha büyük mesafelere yayınır. Bu sebeple, türbülanslı akışta sadece Stokes sayısı yeterli olmamakta, aynı zamanda ortalama Reynolds sayısı da bir parametre olmaktadır. Bu her iki büyüklüğü de (f ve *Re*) içeren bir parametre Stokes sayısından yola çıkılarak elde edilebilir. Bu parametre bazen türbülanslı Stokes sayısı olarak da adlandırılır ve $S_t=\omega d/U_\tau$ şeklinde tanımlanır. Bu sayı boru yarıçapının, "türbülanslı Stokes tabaka" kalınlığına oranı olarak yorumlanabilir. Türbülanslı Stokes sayısı daimi olmayan akışları karakterize etmek için tanımlanan Strouhal sayısına ($\omega d/U$) benzemektedir ve bu sayının özel bir hali gibi düşünülebilir.

S sadece frekansa bağlı iken S_t hem frekansın hem de ortalama Reynolds sayısının (U_τ yoluyla) bir fonksiyonudur. S_t'yi kullanarak, pulzasyonlu akışları frekanslarına göre sınıflandırmak mümkündür. Bu sınıflandırmayı Ramaprian ve Tu (1983) şöyle yapmıştır:

$S_t \leq 0.1$	sanki-sürekli rejim	(I.bölge)
$0.1 < S_t \leq \omega_{b,min}$	düşük frekanslı rejim	(II.bölge)
$\omega_{b,min} < S_t \leq \omega_{b,0}$	orta frekanslı rejim	(III.bölge)
$\omega_{b,0} < S_t \leq \omega_{b,max}$	yüksek frekanslı rejim	(IV. bölge)
$\omega_{b,max} < S_t$	hızlı pulzasyonlu rejim	(V.bölge)

Ramaprian ve Tu (1983) ortalama (ensemble-averaged) hızın I. bölge de sanki-sürekli rejimdeki gibi ele alınabileceğini ancak II. bölgede boru kesitinde her noktada, uygulanan kesit-boyunca ortalama hıza göre hem genliğinde bir farklılığın hem de bir faz farkının oluşacağını ileri sürmüştür. Diğer bölgelerde ise bu farklılığın ancak türbülanslı Stokes tabaka içerisinde oluşacağını, bu tabakanın dışında akışın sanki katı bir kütle gibi salınacağını ortaya koymuştur. Akışın türbülans yapısı dikkate alındığında ise yukarıda da belirtildiği gibi, uygulanan pulzasyonun türbülans yapısını I. ve II. bölgelerde etkilemediği, III. bölgede etkilemeye başladığı ve bu etkinin boru kesiti boyunca büyük bir alana yayıldığı, IV. ve V. bölgede ise etkinin kuvvetli olduğu ve yüksek frekanslarda türbülansın boru merkezine doğru "donduğu" bulunmuştur.

Benzer bir sınıflandırma Valueva ve arkadaşları (1994) tarafından da yapılmıştır:

$S_t < 5.65\times10^{-3}$	sanki-sürekli rejim	(I.bölge)
$5.65\times10^{-3} < S_t < 45$	orta frekanslı rejim	(II.bölge)
$S_t > 45$	yüksek frekanslı rejim	(III.bölge)

Bu değerler Valuve ve arkadaşları (1994) tarafından verilen orijinal değerlerden farklıdır. Bunun sebebi ve S_t'nin Valueva ve arkadaşları tarafından küçük bir farkla tanımlanmasından dolayı kaynaklanmaktadır. Standart bir karşılaştırma yapabilmek için onlanır tanımladığı S_t, Ramaprian ve Tu (1983) tarafından verilen S_t cinsinden yazılmış ve sınır değerleri de buna göre değiştirilmiştir. Valueva ve arkadaşları, I. bölgede $\overline{Nu}_p$'nin $\overline{Nu}_{ss}$'den daha düşük olacağını, II. bölgede ise uygulanan pulzasyonun genliğine bağlı olarak ya aynı ya da daha büyük olacağını, yüksek frekans bölgesinde ise türbülansın "donmasından" dolayı tekrar $\overline{Nu}_p$'nin $\overline{Nu}_{ss}$'ye yaklaşacağını ileri sürmüşlerdir.

Liao ve Wang (1988), Ramaprian ve Tu'nun sınıflandırmasını esas alarak, I. ve II. bölgelerde $\overline{Nu}_p$'nin $\overline{Nu}_{ss}$'den daha düşük olacağını, tersinin ise ancak IV. ve V. bölgelerde oluşabileceğini belirtmişlerdir.

Jackson ve He (1994) ise sınıflandırmayı sadece iki gurup halinde

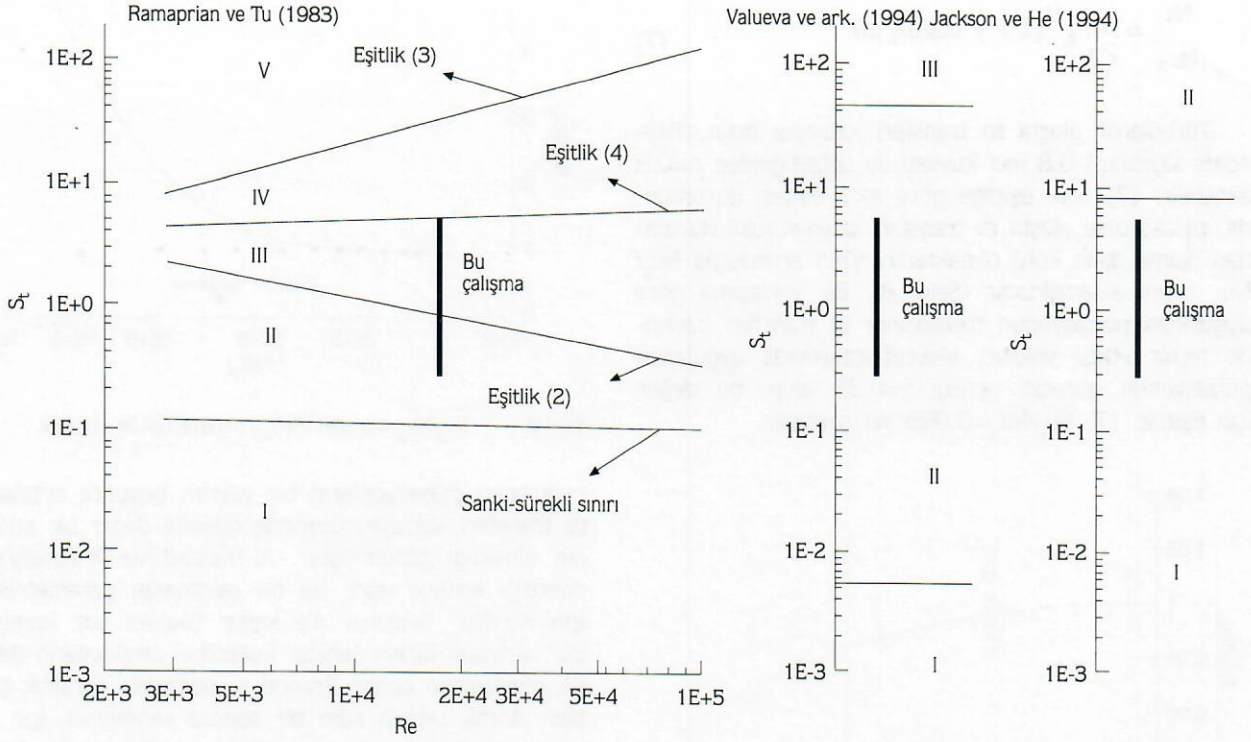
$$\frac{P}{(d/2)/(\frac{2}{3}U_\tau)}$$

parametresini kullanarak yapmıştır. Bu parametre S_t cinsinden yeniden yazıldığında

$S_t < 8.377$	düşük frekanslı rejim	(I. bölge)
$S_t > 8.377$	yüksek frekanslı rejim	(II. bölge)

şeklinde bir sınıflandırma elde edilir. Jackson ve He (1994) türbülansın uygulanan pulzasyona ilk olarak cidar bölgesinde ve çok az bir gecikmeyle cevap verdiğini, boru merkezine doğru gidildikçe bu gecikmenin arttığını ve ayrıca II. bölgede türbülansın boru merkezinde "donduğunu" bulmuşlardır.

Görüldüğü gibi Ramaprian ve Tu (1983) pulzasyonlu akışları 5 bölgeye ayırırken Valueva ve arkadaşları (1994) 3, Jackson ve He (1994) ise 2 bölgeye ayırmışlardır. Bu bölgelerin birbirlerine göre durumu Şekil 7 de gösterilmiştir. Şekilde ayrıca bu çalışmanın parametreleri için hesaplanan S_t'de gösterilmiştir. Mevcut çalışma Ramparian ve Tu'nun sınıflandırmasına göre II. ve III. bölge-



Şekil 7. Pulzasyonlu akışların türbülanslı Stokes sayısı kullanılarak sınıflandırılması.

de, Valueva ve arkadaşlarına göre II. bölgede ve Jackson ve He'ye göre ise I. bölgede yer almaktadır.

Ramaprian ve Tu'nun (1983) sınıflandırması esas alındığında, bu çalışmada uygulanan pulzasyonun akışın türbülans yapısını II. bölgede kalan düşük frekanslı deneylerde (P>60 s) etkilemediği, III. bölgede kalan daha yüksek frekanslı deneylerde ise etkilemeye başladığı ve bu etkinin boru kesiti boyunca büyük bir alana yayıldığı söylenebilir. Akışın hız yapısı dikkate alındığında ise ortalama (ensemble-averaged) hızın II. bölgede kalan deneylerde, boru kesitinde her noktada etkilendiği III. bölgede kalan deneyler için ise bu etkinin türbülanslı Stokes tabaka içerisinde sınırlandırıldığı söylenebilir. Jackson ve He'nin (1994) çalışmasına göre de bu çalışmada ele alınan sınırlar içerisinde boru merkezinde tübülansta herhangi bir "donma" meydana gelmemektedir.

Uygulanan pulzasyondan dolayı gerek ortalama (ensemble-averaged) hız gerekse türbülans yapısında meydana gelen bu değişimler, Nu_p ve Nu_{ss} arasında genlik ve zaman farkına (faz farkına) yol açmakla birlikte (Şekil 2(d)), bir çevrim boyunca ortalama ısı transferi katsayısında ölçülebilecek büyüklüklükte bir değişikliğe sebep olmamıştır (Şekil 6). Bu Liao ve Wang'ın (1988) sonuçlarıyla uyuşmamaktadır. Liao ve Wang, II. bölgede $\overline{Nu}_p$'nin $\overline{Nu}_{ss}$'den daha düşük olacağını belirtmişlerdir.

Ramaprian ve Tu (1983) ve Valueva ve arkadaşlarının (1994) sınıflandırmasında I. bölge sanki-sürekli rejim bölgesi olarak adlandırılmıştır. Bu bölgede, pulzasyonlu akışta bir çevrim boyunca ortalama ısı transferi katsayısı anlık hız değerleri kullanılarak

$$\frac{\overline{Nu}_p}{\overline{Nu}_{ss}} = \frac{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} \langle V_k \rangle^n d\theta}{\left[\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} \langle V_k \rangle d\theta\right]^n} \qquad (5)$$

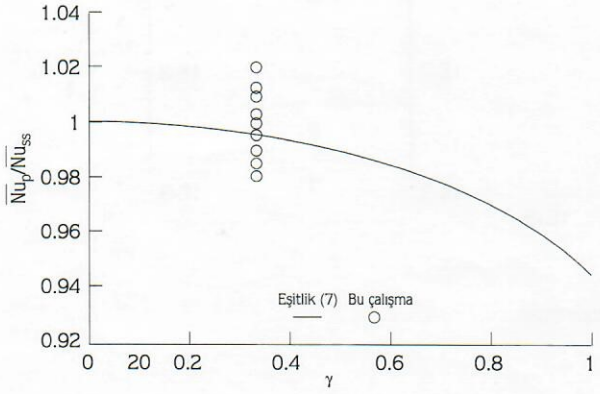
şeklinde ifade edilebilir (Baird ve ark., 1966). Eğer uygulanan hızın $\langle V_k \rangle$ değişimi bu çalışmada olduğu gibi

$$\langle V_k \rangle = \bar{V}_k [1+\gamma \cos(\omega t)] \qquad (6)$$

şeklinde ise (5) nolu eşitlik şu şekilde yazılabilir:

$$\frac{\overline{Nu_p}}{\overline{Nu_{ss}}} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}[1+\gamma\cos(\theta)]^n d\theta \qquad (7)$$

Türbülanslı akışta ısı transferi katsayısı hızın (Reynolds sayısının) 0.8 inci kuvveti ile değiştiğinden n=0.8 alınabilir. (7) nolu eşitliğe göre n<1 olması durumunda, pulzasyonlu akışta ısı transferi sanki-sürekli durumdan daima daha kötü olmaktadır. γ'nın artmasıyla $\overline{Nu_p}/\overline{Nu_{ss}}$ oranı azalmaktadır (Şekil 8). Bu yaklaşıma göre uygulanan pulzasyonun frekansının ısı transferi üzerinde hiçbir etkisi yoktur. Mevcut çalışmada uygulanan pulzasyonun göreceli genliği γ=0.33 olup, bu değer için Eşitlik (7) $\overline{Nu_p}/\overline{Nu_{ss}}$=0.995 vermektedir.

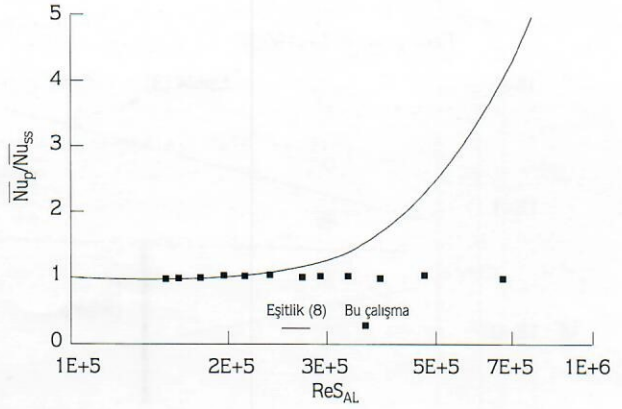


Şekil 8. $\overline{Nu_p}/\overline{Nu_{ss}}$ oranının "sanki-sürekli" yaklaşıma göre uygulanan pulzasyonun göreceli genliği ile değişimi.

Al-Haddad ve Al-Binally (1989) akışkan olarak havayı kullanarak hem sürekli akışta hem de pulzasyonlu akışta deneyler yapmışlardır. Sürekli akış deneylerinin Colburn eşitliği ile temsil edilebileceğini belirtmişler ve pulzasyonlu akışta elde ettikleri ısı transferi katsayısı için de bir eşitlik vermişlerdir. Bu eşitlikten yola çıkarak Al-Haddad ve Al-Binally'nin deneyleri için pulzasyonlu akıştaki ısı transferi katsayısının sürekli akıştakine oranı şu şekilde yazılabilir;

$$\frac{\overline{Nu_p}}{\overline{Nu_{ss}}} = 1+\frac{5.6}{23}\,\frac{(ReS_{AL}x10^{-5}-2)^2}{1+0.17\,(ReS_{AL}x10^{-5}-2)} \qquad (8)$$

(8) nolu eşitlik Şekil 9 da çizilmiştir. Bu eşitliğe göre uygulanan pulzasyon, ($ReS_{AL}<2.1x10^5$) olması halinde ısı transferinde dikkate değer bir değişiklik meydana getirmemekte, tersi durumda ise ısı transferini iyileştirmektedir. Şekil 9 da bu çalışmadan elde edilen veriler de gösterilmiştir. Yukarıda da belirtildiği gibi, bu çalışmada ele alınan parametre sınırları içerisinde,



Şekil 9. $\overline{Nu_p}/\overline{Nu_{ss}}$ oranının (ReS_{AL}) parametresi ile değişimi.

uygulanan pulsazyonların bir çevrim boyunca ortalama ısı transferi katsayısı üzerinde dikkate değer bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Al-Haddad ve Al-Binally'nin önerdiği eşitliğe göre ise bu çalışmanın parametreleri için $\overline{Nu_p}/\overline{Nu_{ss}}$ oranının 4'e kadar çıkması söz konusudur. Aradaki farkın sebebi, kullanılan akışkanların değişik olmasından dolayı Prandtl sayılarındaki farklılık olabilir. Ancak tatmin edici bir sonuca varabilmek için Pr sayısının etkisinin de sistemli bir şekilde araştırılması gerekir. Ayrıca bu araştırmacılar, uygulanan pulzasyonun genliğinin ısı transferi üzerindeki etkisinin ihmal edilebilecek seviyede olduğunu ileri sürmüşlerdir. Diğer bazı çalışmalar (örneğin Liao ve Wang, 1988) ise bunun doğru olmadığını, pulzasyonlu akışta genliğin de ısı transferi katsayısını belirleyici bir parametre olduğunu belirtmişlerdir. Buradan, Al-Haddad ve Al-Binally tarafından verilen (8) nolu eşitliğin genel bir eşitlik olmayıp, sadece kendileri tarafından hava için elde edilen veriyi temsil ettiği görülmektedir.

Görüldüğü gibi pulzasyonlu akışları incelemek için türbülanslı Stokes sayısı yeterli olmakla birlikte, ısı transferi problemlerinde uygulanan pulzasyonun ortalama Reynolds sayısı ve frekansının yanında genliğini de dikkate alan yeni bir parametre elde edilmelidir. Bu parametreyi oluşturabilmek için ise, aynı koşullarda Reynolds sayısının, genliğin ve frekansın sistemli olarak geniş bir aralıkta değiştirilmesiyle elde edilecek ısı transferi verisine ihtiyaç vardır. Ayrıca pulzasyonlu akışlarda ısı transferi mekanizmasına tatmin edici bir açıklamanın getirilebilmesi için boru cidar sıcaklıklarının yanında yerel akışkan sıcaklığının da ölçülmesi gereklidir.

Sonuç

Uygulanan akış pulzasyonları, boru cidar sıcaklığının, duvar ısı akısı şiddetinin ve ısı transferi katsayısı-

nın da sinusoidal bir şekilde değişimine yol açmıştır. Ancak her üç büyüklük de uygulanan pulzasyonu belirli bir gecikme (faz farkı) ile takip etmiştir. Pulzasyonlu akışta ısı transferi katsayısı, anlık Reynolds sayısı kullanılarak elde edilen sanki-sürekli ısı transferi katsayısından anlık olarak daha büyük veya daha küçük olmakla birlikte, ortalama ısı transferi katsayıları dikkate alındığında pulzasyonların ısı transferine etkisi ihmal edilebilecek düzeydedir.

Semboller

A : Genlik

d : Boru çapı [m]

f : Frekans [1/s]

h : Isı transferi katsayısı $\{=q_d/(T_d-T_o)\}$

m : Kütlesel debi [kg/s]

k : Isı iletim katsayısı [W/mK]

Nu : Nusselt sayısı $\{=h\ d/k\}$

P : Periyod [s]

Pr : Prandtl sayısı

q : Isı akım şiddeti [W/m^2]

Re : Reynolds sayısı $\{= V\ d/\nu\}$

S : Stokes sayısı $\{1/2d\ (\omega/2\nu)^{1/2}\}$

S_t : Türbülanslı Stokes sayısı $\{=\omega d/U_\tau\}$

S_{AL} : Al-Haddad ve Al-Binally tarafından tanımlanan Stokes sayısı $\{=1/2d(\omega/\nu)^{1/2}\}$

t : Zaman [s]

T : Sıcaklık [°C]

U_τ : Sürtünme hızı $\{= \sqrt{T_d/\rho}\}$

V : Hız [m/s]

x : Isıtmanın başlatıldığı kesitten itibaren ölçülen eksenel mesafe [m]

γ : Göreceli genlik $\{=A/\bar{m}\}$

θ : Faz açısı $\{=\omega t\}$

ν : Kinematik vizkozite [m^2/s]

τ : Kayma gerilmesi [N/m^2]

ω : Açısal frekans $\{=2\pi f\}$

Alt İndisler

b : Türbülans patlama (turbulent bursting)

d : Duvar

max : En büyük

min : En düşük

k : Boru kesiti boyunca ortalama

o : Ortalama

p : Pulzasyonlu

PK : Petukhov-Kirillov

ss : Sanki-sürekli

Diğer Semboller

<> : Ortalama (ensemble-averaged)

— : Zamana göre ortalama

Kaynaklar

Al-Haddad, A. ve I-Binally, N., "Prediction of heat transfer coefficient in pulsating flow", Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 10 (2), pp. 131-133, 1989. Havemann ve ark., 1956.

Baird, M.H.I., Duncan, G.J., Smith, J.I. ve Taylor, J., "Heat transfer in pulsed turbulent flow", Chem. Eng. Science, Vol. 21, pp. 197-199, 1966.

Barnett, D.O. ve Vachon, R.I., "An analysis of convective heat transfer for pulsating flow in a tube", Proc. 4th Int. Heat Transfer Conference, Vol. 3, 1970.

Büyükalaca, O., "Studies of convective heat transfer to water in steady and unsteady pipe flow", PhD. Thesis, University of Manchester, 1993.

Hanby, V.I., "Convective heat transfer in a gas fired pulsating combustor", J. Eng. Power Trans. ASME, 1969.

Havemann, H.A., Narayan Rao, N.N., Jaychandra, P. ve Gary, G.C., "Study for new hot air engine", J. of Indian Ins. of Science, 38B, pp.171-202, 1956.

Jackson, J.D. ve He, S., "An experimental study of pulsating turbulent pipe flow", Proc. of Int. Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, Lisbon, Portugal, 1994.

Jackson, J.D., Büyükalaca, O. ve He, S., "Heat transfer in a pipe under conditions of transient turbulent flow", Proc. Int. Conference on Turbulent Heat Transfer, SanDiego, USA, 1996.

Liao, N. ve Wang, C.C., "On the convective heat transfer in pulsating turbulent pipe flow", Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics 1988, (Ed: Shah, R.K., Ganic, E.N. ve Yang, K.T.), Elsevier Science Publishing Co., 1988.

Mameyev, V.V., Nosov, V.S. ve Syromyatnikov, N.I., "Investigation of heat transfer in pulsed flow of air in pipes", Heat Transfer Soviet Research, Vol. 8 (3), pp. 111-116, 1976.

Mizushina, T., Maruyama, T. ve Shiozaki, Y., "Pulsating turbulent flow in a tube", J. of Chem. Eng. of Japan, Vol. 6 (6), pp. 487-494, 1973.

Mizushina, T., Maruyama, T. ve Hirasawa, H., "Structure of the turbulence in pulsating pipe flows", J. of Chem. Eng. of Japan, Vol. 8 (4), pp. 210-216, 1975.

Mueller, W.K., "Heat transfer characteristics of periodically pulsating turbulent pipe flow", Proc. 5th Midwestern Conference on Fluid Mechanics, pp. 146-159, 1957.

Muller, J.L., "The development of resonant combustion heater for drying appilcations", The South African Mech. Eng. pp. 137-146, 1967.

Park, J.S., Taylor, M.F. ve McEligot, D.M., "Heat transfer to pulsating turbulent gas flow", Proc. 7th Int. Heat Transfer Conference, Vol. 3, pp. 105-110, 1982.

Petukhov, B.S. ve Kirillov, V.V., "The problem of heat exchange in the turbulent flow of fluids in tubes", Teploenergetika Vol. 6, pp. 72-80, 1958.

Ramaprian, B.R. ve Tu, S.W., "Fully developed periodic turbulent pipe flow, Part 2. The detailed structure of the flow", J. Fluid Mech. Vol. 137. pp. 59-81, 1983.

Valueva, E.P., Popov, V.N. ve Romanova, S.Y., "Heat transfer in pulsating turbulent flow in a round tube", Thermal Engineering, Vol. 41(3), pp. 182-193, 1994.

West, F.B. ve Taylor, A. T., "The effect of pulsations on heat transfer turbulent flow of water inside tubes", Chem. Eng. progress, Vol. 48(1), pp. 35-43, 1952.