Tr. J. of Engineering and Environmental Sciences
19 (1995) 461-470
© TÜBİTAK

Düşey Bir Boruda Serbest Konveksiyonun Zorlanmış Konveksiyonla Aynı Yönde Olması Durumunda Isı Transferi

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

Geliş Tarihi: 9 / 2 / 1995

Özet: Bu çalışmada ısıtılmış düşey bir boru içerisindeki suyun yukarıya doğru türbülanslı akışında kaldırma kuvvetlerinin zorlanmış konveksiyonu nasıl etkilediği deneysel olarak araştırılmıştır. Ölçülen büyüklüklerden faydalanılarak yerel ısı transferi katsayıları hesaplanmış ve zorlanmış konveksiyon ile karşılaştırılmıştır. Kaldırma kuvvetlerinin büyüklüğüne bağlı olarak, birleşik konveksiyonda ısı transferinin zorlanmış konveksiyondan daha kötü veya daha iyi olabileceği görülmüştür. Boru duvar sıcaklıklarında belirli eksenel mesafelerde tepelerin oluştuğu belirlenmiş, bu mesafeler ve bu mesafelerdeki ısı transferi katsayıları için eşitlikler elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Isı Transferi, Birleşik Konveksiyon, Karışık Konveksiyon, Kaldırma Kuvvetleri, Türbülanslı Akış

Buoyancy-Aided Mixed Convection in a Vertical Tube

Abstract: An experimental investigation of the influence of buoyancy on turbulent convective heat transfer to water flowing upward in a heated vertical tube is presented. Local heat transfer coefficients are obtained using the measured quantities and compared with corresponding forced convection values. It was found that heat transfer could be either imparied or enhanced relative to the forced convection value depending on the extent to which buoyancy influences were present. The development of a localized peak in the wall temperature distribution was noticed. Correlation equations were obtained for the position at which these peaks occur and for the heat transfer coefficient at the peaks.

Key Words: Heat Transfer, Mixed Convection, Combined Convection, Buoyancy, Turbulent Flow

Giriş

Konveksiyonla ısı transferinin en belirgin iki türü, zorlanmış ve serbest konveksiyondur. Zorlanmış konveksiyonda akışkanın akışı, sistemin açık sınırlarına dışarıdan uygulanan bir basınç farkından dolayıdır. Serbest konveksiyonda ise hareket yoğunluk değişimlerinden dolayı meydana gelen kaldırma kuvvetlerinin ve yerçekimi kuvvetinin bir neticesidir. Gerçekte, zorlanmış konveksiyonla ısı transferinde de daima bir sıcaklık farkı söz konusu olduğundan buna bağlı olarak yoğunluk değişimlerinin olması kaçınılmazdır. Bu sebeple, birçok durumda, her iki tür aynı anda mevcuttur ve bunların büyüklüğü birbirleriyle kıyaslanabilir mertebede olabilir. Böyle bir konveksiyon genellikle *birleşik konveksiyon* veya *karışık konveksiyon* olarak adlandırılabilir.

Birleşik konveksiyonda, düşey kanallarda zorlanmış akışta serbest konveksiyon ısı transferini ihmal edilemeyecek mertebede etkiler. Kaldırma kuvvetlerinin ısı transferine etkisi akış yönüne (aşağıya veya yukarıya) ve ısıl sınır şartlara (ısıtma veya soğutma) bağlı olarak arttıracak veya azaltacak şekilde değişir. Bu parametrelere bağlı olarak, kaldırma kuvvetleri ya zorlanmış akışa zıt yönde (ısıtma, aşağıya akış veya soğutma, yukarıya akış) veya aynı (ısıtma, yukarıya akış veya soğutma, aşağıya akış) yönde etkiyebilir.

Düşey kanallarda, laminar akış durumunda zorlanmış ve serbest konveksiyon arasındaki etkileşimi teorik ve deneysel olarak incelemek nispeten kolaydır ve bu konuda yapılan çalışmalar (Jackson ve arkadaşları, 1989) şu genel sonucu ortaya koymuştur: Eğer kaldırma kuvvetleri ile zorlanmış akış aynı yönde ise birleşik konveksiyonda ısı transferi zorlanmış konveksiyona göre iyileşmekte tersi durumda ise kötüleşmektedir.

Bu çalışmada ise türbülanslı akış ele alınmıştır. Kaldırma kuvvetlerinin zorlanmış akışla aynı yönde olması durumunda, yani ısıtılmış, düşey bir boru içerisindeki yukarıya doğru akışta ısı transferi deneysel olarak incelenmiştir.

Önceki Çalışmalar

İlk konveksiyonla ısı transferi çalışmalarında zorlanmış ve serbest konveksiyon ayrı ayrı ele alınarak bunlar arasındaki etkileşim dikkate alınmamıştır (Jackson ve arkadaşları, 1989). Ancak daha sonra kritik basınçtaki akışkanlarla yapılan çalışmalar bu etkileşimin önemini açığa çıkarmış ve takip eden çalışmalar etkileşimin sadece kritik basınçtaki akışkanlarla sınırlı olmayıp normal basınçtaki akışkanlar için de geçerli olduğunu ortaya koymuştur.

Kaldırma kuvvetlerinin zorlanmış konveksiyon üzerindeki etkisini görmek için akışkan olarak havanın kullanıldığı birçok araştırma mevcuttur.

İlk çalışmalardan birisi Eckert ve Diagula (1954) tarafından yapılmıştır. Ancak deneyler çok kısa bir boruda yapıldığı için elde edilen sonuçlar düşey borudan çok düşey levhada ısı transferi olarak ele alınmıştır. Brown ve Gauvin (1966) laminar rejimden türbülanslı rejime geçiş bölgesinde deneyler yapmışlardır. Byrne ve Ejiogu (1971), kaldırma kuvvetlerinin ısı transferi katsayısını zorlanmış konveksiyona göre düşürdüğünü belirtmişlerdir. Carr ve arkadaşları (1973) boru çapı boyunca hız, sıcaklık ve türbülans ölçümleri yapmışlar ve bu profillerin zorlanmış konveksiyon durumunda elde edilebilecek değerlerden saptığını göstermişlerdir. Benzer bir çalışma Polyakov ve Shindin (1988) tarafından gerçekleştirilmiş ve boru cidarına yakın bölgede türbülans ısı taşınımının momentum taşınımından daha fazla bastırıldığı, bunun neticesi olarak da ısı transferinin zorlanmış konveksiyona göre azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca kaldırma kuvvetlerinin etkisiyle hız dağılımının bilinen şeklinden çıkıp M şekline benzemeye başladığı görülmüştür.

Kaupas ve Poskas'da (1991a, 1991b) literatürde hava için mevcut verilerden yola çıkarak birleşik konveksiyon için eşitlikler geliştirmişlerdir. Bu araştırıcılar, akışkanın fiziksel özelliklerinin sıcaklıkla değişmesinin dikkate alınıp alınmamasına, $Gr^*/4Re^3Pr$ parametresinin büyüklüğüne ve sıcaklık maksimum ve minimumlarının meydana geldiği eksenel mesafelere göre, bu iki çalışmada 9 adet değişik eşitlik önermişlerdir. Ayrıca bu bağıntıların kullanılabilmesi için gerekli olan sıcaklık maksimum ve minimumlarının oluştuğu eksenel mesafelerin ve bu noktalardaki ısı transferi katsayılarının hesaplanabilmesi için de eşitlikler verilmiştir. Ancak bu eşitliklerin diğer araştırmacıların deneysel sonuçlarını temsil edip etmediği kontrol edilmemiştir.

Havadan başka, Tanaka ve arkadaşları (1987) basınçlı nitrojen gazı kullanarak deneyler yapmışlar ve birleşik konveksiyonda ısı transferinin zorlanmış konveksiyona göre kötüleştiğini ifade etmişlerdir.

Hava ile yapılan çalışmaların yanında, akışkan olarak su kullanılarak yapılan çalışmaların sayısı oldukça sınırlıdır.

Herbert ve Sterns (1972) yaptıkları deneyler neticesinde birleşik konveksiyon ısı transferi katsayısının zorlanmış konveksiyona göre dikkate değer oranda düşük olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu çalışmada, ısı transferi katsayısı için bir bağıntı da verilmiştir. Ancak bağıntıda geçen Grashof sayısının tanımından dolayı kullanışı pratik değildir.

Kenning ve arkadaşları (1974) su ile yaptıkları deneylerde, verilen ısı akım şiddetine bağlı olarak, boru cidar sıcaklığının belirli eksenel mesafelerde tepe yaptığını bulmuşlardır. Ayrıca, bu sıcaklık tepelerinin, $Gr^*/Re^{3,4}Pr^{0,4}>4x10^{-5}$ olması durumunda oluştuğunu belirtmişler ve bu tepelerin görüldüğü eksenel mesafe ve bu mesafelerdeki ısı transferi katsayısı için şu eşitlikleri elde etmişlerdir;

$$\frac{x_t}{d} = 0,07\ \frac{Re^3Pr^{1,2}}{Gr^*} \qquad (1)$$

$$Nu_{ed} = 0,075\ (Gr^*Pr)^{0,25} \qquad (2)$$

Burada birinci eşitlikteki büyüklükler ortalama akışkan sıcaklığında alınırken ikincisinde ise film sıcaklığında alınmalıdır.

Kenning ve arkadaşlarının (1974) sonuçlarına benzer şekilde, kritik basınçtaki akışkanların (su ve CO_2) yanında atmosferik basınçtaki su ile yaptığı deneylerde Fewster'da (1976) boru cidar sıcaklığının belirli eksenel mesafelerde tepe oluşturduğunu belirtmiştir. Bu araştırmada elde edilen diğer bir sonuç ise, kaldırma kuvvetlerinin laminar rejimden türbülanslı rejime daha küçük Reynolds sayılarında geçişe sebep olduğudur.

Petukhov (1977), Petukhov ve Strigin (1968) tarafından elde edilen verileri kullanarak ısı transferi katsayısı için Re ve Ra_A nın belirli aralığında ve $x/d>40$ mesafesinde geçerli olan eşitlikler önermişlerdir. Ancak bu eşitliklerin kullanılabilmesi için ortalama akışkan sıcaklığının boru boyunca değişiminin (dT_o/dx) önceden bilin-

mesi gereklidir. Bu sebeple bu eşitliklerin pratikte kullanımı sınırlıdır.

Rouai'de (1987) su kullanarak yaptığı deneylerde hem laminar hem de türbülanslı akış bölgesinde çalışmış ve kaldırma kuvvetlerinin zorlanmış konveksiyon üzerine etkisini açıkça ortaya koymuştur. Rouai bütün eksenel mesafelerde geçerli olan sabit bir eşitlik türetmenin zorluğunu belirterek sıcaklık maksimumlarının meydana geldiği eksenel mesafe ve bu mesafelerdeki ısı transferi katsayısı için şu eşitlikleri önermiştir;

$$\frac{x_t}{d} = 0{,}051 \left[\frac{Gr^*}{Re^{3{,}425} Pr^{0{,}8}}\right]^{-0{,}8} \quad (3)$$

$$\frac{Nu_{ed}}{Nu_{zk}} = 14{,}91 \left[\frac{Gr^*}{Re^{3{,}425} Pr^{0{,}8}}\right]^{0{,}28} \quad (4)$$

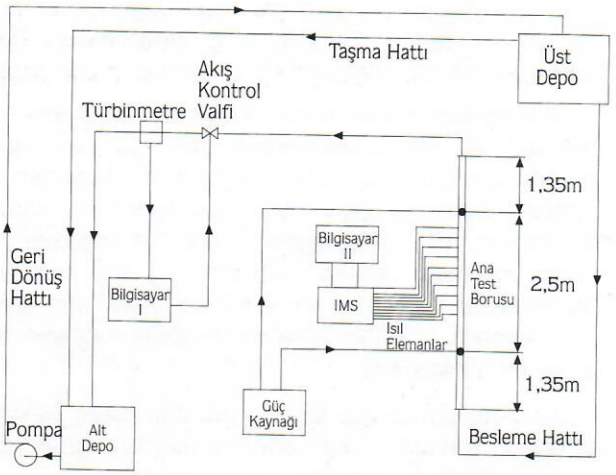
Kapinos ve Remizov (1988), kendilerinin su ile yaptığı deneylerden elde ettiği ve literatürde mevcut bazı verileri kullanarak, birleşik konveksiyon için eşitlikler önermişlerdir. Ancak Petukhov (1977) tarafından verilen eşitliklerde olduğu gibi, bu eşitliklerin kullanılabilmesi için, ortalama akışkan sıcaklığının boru boyunca değişiminin önceden bilinmesi gereklidir ve bu pratikte mümkün değildir. Ayrıca bu çalışmada elde edilen eşitliklerin hava için başarılı sonuç vermediği Kaupas ve Poskas (1991a) tarafından rapor edilmiştir.

Bu konuda yapılan sınırlı sayıdaki araştırmalarda elde edilen veriyi veriliş biçiminden dolayı birbirileri ile doğrudan kıyaslamak mümkün değildir. Ayrıca ısı transferi katsayısı için önerilen eşitlikler sadece elde edildikleri veriyi temsil etmekte olup, diğer araştırmacılar tarafından bulunan veriyi temsil etmekten uzaktır. Birleşik konveksiyonla ısı transferinin fiziksel olarak daha iyi anlaşılabilmesi ve ısı transferi katsayısı hesabında kullanılabilecek genel eşitliklerin çıkarılabilmesi için kaldırma kuvvetlerinin geniş bir aralığında veriye ihtiyaç vardır. Bu çalışma böyle bir amaç göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir.

Deney Düzeneği

Bu çalışmada, atmosferik basınçtaki su akışkan olarak kullanılmıştır. Deneylerin yapıldığı kapalı devre düzenek Şekil 1 de şematik olarak gösterilmiştir.

Suyun boru içerisinden akışını sağlamak için bir depo, kat seviyesinden 15 m yükseğe yerleştirilmiştir. Su bu depodan yerçekimi etkisi ile besleme borusundan geçerek ana test borusuna gelir. Buradan çıkan su debi kontrol valfi ve debi ölçerden geçtikten sonra alt depoya dökülür. Buradan da bir sirkülasyon pompası yardımıyla dönüş hattından üst depoya pompalanır. Deney düzeneği, bütün deneysel şartlarda, dönüş hattından pompalanan su debisi ana test borusundan geçen su debisinden büyük olacak şekilde tasarlanmıştır. Böylece suyun daima taşma hattından akması sağlanarak, üst depoda su seviyesinin sabit kalması, dolayısıyla da bir deney boyunca ana test borusundan geçen debinin sabit kalması sağlanmıştır.



Şekil 1. Birleşik Konveksiyon Test Düzeneğinin Şematik Resmi.

Ana test borusu 98,3 mm iç çapında, 1,65 mm cidar kalınlığında, 5,2 m boyunda, paslanmaz çelik bir borudur. Borunun giriş kısmına, dört girişli bir karışım elemanı eklenmiştir. Ayrıca girişte akışı üniform hale getirmek için balpeteği şeklinde akış düzenleyicilerinden faydalanılmıştır. Tüm sistem cam yünü kullanılarak yalıtılmıştır.

Ana test borusunun merkezi 2,5 m uzunluğundaki kısmı alternatif elektrik akımı yardımıyla doğrudan ısıtılmıştır. Ayarlanabilir bir sistem vasıtasıyla, elektrik akımı güç kaynağından kalın alüminyum kelepçelerle ana test borusuna iletilmiştir.

Ana test borusundan geçen suyun debisi bir bilgisayar (I) tarafından kontrol edilen basınçlı hava ile çalışan bir kontrol valfi tarafından ayarlanmaktadır.

Sıcaklık ölçümleri için, toplam 40 kromel-alümel ısıl eleman çifti ana test borusunun dış yüzeyine 100 mm aralıklarla kaynatılmıştır. Ayrıca, boru çevresinde sıcaklık farkı oluşup oluşmadığını anlamak için, boru ekseni boyunca 5 değişik istasyonda, boru çevresine 4 ısıl eleman çifti yerleştirilmiştir. Suyun ana test borusuna giriş ve çıkış sıcaklıkları boru içerisine yerleştirilen kromel-alümel ısıl eleman içeren problar yardımıyla ölçülmüştür.

Ana test borusundan geçen suyun debisinin ölçümü için ise bir türbin tipi debi ölçer kullanılmıştır. Debi ölçer çıkış sinyali, bilgisayar (I) tarafından okunmuştur.

Isıl eleman elektromotor kuvvetleri ise başka bir bilgisayar (II) tarafından kontrol edilen bir veri toplama sistemi (Solartron 3510 Integrated Measurement System) vasıtasıyla ölçülmüştür. Bu sistem 64 kanallı bir tarayıcı, bir analog/sayısal çevirici ve bilgisayar ile sistem arasında iletişimi sağlayan bir ara devreden oluşmaktadır. Sistem ayrıca sıcaklık ölçümleri için gereken referans sıcaklığını elektronik olarak sağlayan bir devre ile donatılmıştır.

Isı akım şiddeti ana test borusundan geçen elektrik akımının ve ısıtılmış kısım boyunca meydana gelen voltaj düşümünün ölçülmesiyle bulunmaktadır.

Su kapalı bir çevrim yaptığından dolayı, ana test borusuna giren suyun sıcaklığını istenilen bir değerde sabit tutmak için, suya ana test borusunda verilen ısı uzaklaştırılmalıdır. Bu amaçla, su üst depodan alınarak, sirkülasyon pompası yardımıyla bir soğutma ünitesinden geçirilerek soğutulmuştur.

Boru iç cidar sıcaklığı, boru duvarındaki radyal ısı iletim denkleminin çözümü ile, ölçülen dış cidar sıcaklığından hesaplanmıştır. Yerel ortalama akışkan sıcaklığı ise belirli bir hacimdeki akışkanın boru ekseni boyunca hareketini takip ederek yazılan bir enerji dengesi yardımı ile elde edilmiştir. Buradan da ısı transferi katsayısı hesaplanmıştır. Yapılan hata analizi sonunda, ısı transferi katsayısının ±%5 lik bir hata ile elde edildiği belirlenmiştir.

Deney Parametreleri

Deneyler iki gurup halinde yapılmıştır. İlk gurup deneylerde ana test borusundan geçen suyun debisi sabit tutularak (Re_g = 16000), boruya verilen elektirik gücü deneyden deneye değiştirilmiştir. Bu durumda, ısı akım şiddeti q_d, 2700 W/m^2 ile 15000 W/m^2 değerleri arasında değiştirilerek 6 değişik koşul denenmiştir.

İkinci gurup deneylerde ise boruya verilen elektrik gücü sabit tutulup (q_d = 15000 W/m^2), debi deneyden deneye değiştirilerek 11 değişik debide ölçümler yapılmıştır (Re_g, 2500 ile 25000 arasında değişmiştir).

Her iki gurup deneyde de suyun test borusuna giriş sıcaklığı 20 ± 0,1 °C de ($Pr_g \cong 7$) sabit tutulmuştur.

Deney Sonuçları ve Tartışma

Örnek olarak, Şekil 2-a da 15000 W/m^2 sabit ısı akım şiddetinde değişik debiler için ölçülen boru dış cidar sıcaklıklarının boyutsuz eksenel mesafe (x/d) ile değişimi verilmiştir. Şekillerde ayrıca hesaplanan ortalama akışkan sıcaklık değerleri de gösterilmiştir.

Denenen en yüksek debi için (Re_g=25000), kaldırma kuvvetlerinin etkisi çok azdır ve dış cidar sıcaklığının x/d ile değişimi düzgündür. Debinin azalmasıyla birlikte kaldırma kuvvetleri etkili olmaya başlar, ancak cidar sıcaklığı dağılımı belirli bir Reynolds sayısına kadar hala düzgündür. Re_g nin 16000 den daha düşük değerler almasıyla cidar sıcaklığının tekdüzeliği bozulur ve cidar sıcaklıklarının önce bir artış gösterdiği bunu ise bir düşüşün takip ettiği görülür. Re_g=12000 durumunda tepe hemen çıkışa yakın bir bölgede meydana gelirken, Reynolds sayısı küçüldükçe tepe noktası akış giriş bölgesine doğru kayar. En düşük debi için (Re_g = 2500) tepe noktası hemen girištedir.

Boru cidar sıcaklığının gelişiminde görülen düzensizlikler, birleşik konveksiyonda hidrodinamik ve ısıl sınır tabaka gelişiminin karmaşık bir yapıya sahip olmasından dolayıdır (Yu, 1991). Ancak, literatürde bu karmaşık gelişimi açıklamaya yardımcı olacak şekilde yapılmış kapsamlı hız, sıcaklık ve türbülans ölçümleri mevcut değildir.

Kaldırma kuvvetlerinin ısı transferine etkisi cidar sıcaklıkları dağılımlarından kolaylıkla görülemez. Bu etki, elde edilen ısı transferi katsayıları, aynı şartlarda sadece zorlanmış konveksiyon olması durumunda (kaldırma kuvvetleri ihmal edilerek) elde edilecek değerlerle karşılaştırıldığında açıkça görülebilir.

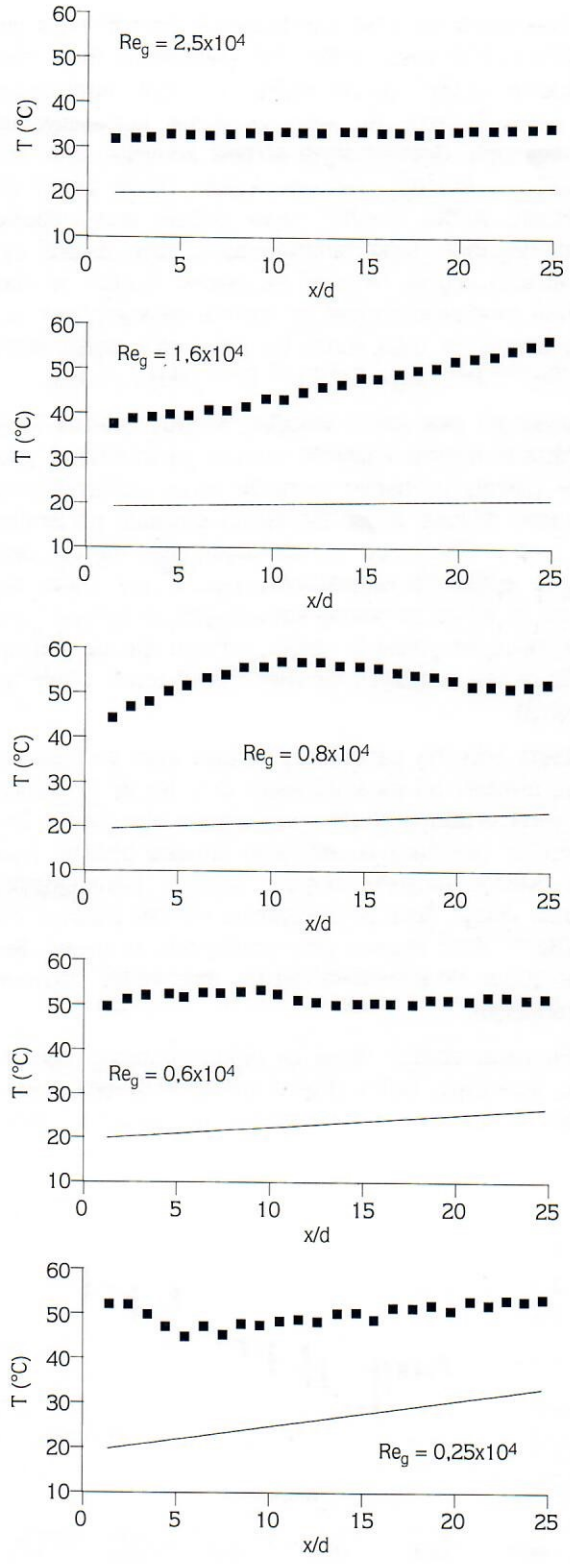
Bu çalışmada, serbest konveksiyonun ihmal edilebileceği şartlarda (zorlanmış konveksiyon) yapılan deneylerden elde edilen ısı transferi katsayılarını temsil etmesi için literatürde mevcut birçok deneysel ve yarıdeneysel eşitliklerden Petukhov-Kirillov (1958)

$$Nu_{PK} = \frac{Re\ Pr\ (f/2)}{1{,}07 + 12{,}7\ (\ Pr^{2/3} - 1)\ (f/2)^{1/2}} \qquad (5)$$

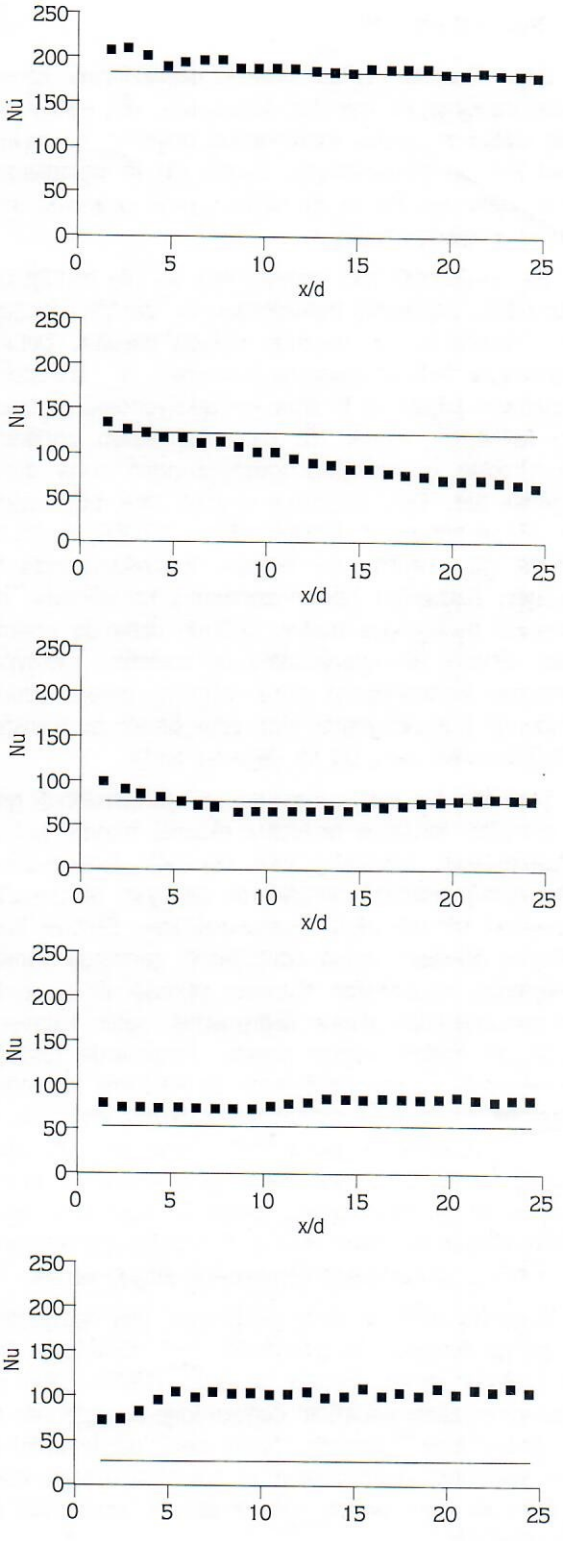
$$(f/2) = [2{,}236\ \ln(Re) - 4{,}639\ ]^{-2}$$

eşitliği kullanılmıştır. Bu eşitlikten hesaplanan değerler zorlanmış konveksiyon bölgesindeki deneysel sonuçlardan yaklaşık %4 oranında yüksek olmuştur. Bu fark tam gelişmemiş hidrodinamik ve ısıl sınır tabakaya, deneysel belirsizliklere ve Petukhov-Kirillov eşitliğinin hata payına (%6) bağlanabilir.

Bu farkı dikkate almak için, Petukhov-Kirillov eşitliğinden bulunan değerler (Nu_{PK}) sabit bir katsayı (0,96) ile çarpılarak zorlanmış konveksiyon ısı transferi katsayıları bulunmuştur;



Şekil 2.a. Boru Dış Cidar Sıcaklığının (Semboller) ve Ortalama Akışkan Sıcaklığının (Çizgiler) Boyutsuz Eksenel Mesafe ile Değişimi.



Şekil 2.b. Deneysel (Semboller) ve Eşitlik (6) dan Elde Edilen Zorlanmış Konveksiyon (Çizgiler) Isı Transferi Katsayılarının Boyutsuz Eksenel Mesafe ile Değişimi.

$$Nu_{zk} = 0{,}96 \times Nu_{PK} \quad (6)$$

Şekil 2-a da verilen sıcaklık dağılımlarına karşılık gelen deneysel ısı transferi katsayıları, (6) eşitliğinden elde edilen zorlanmış konveksiyon değerleri ile birlikte Şekil 2-b de gösterilmiştir. Eşitlik (5) in hesaplanmasında kullanılan Re ve Pr sayıları yerel ortalama akışkan sıcaklığında alınmıştır.

Re_g = 25000 için deneylerden ve (6) eşitliğinden elde edilen zorlanmış konveksiyon ısı transferi katsayıları arasında iyi bir uyumun olduğu görülür. Debinin azalmasıyla birlikte kaldırma kuvvetleri ısı transferini etkilemeye başlar ve birleşik konveksiyondaki ısı transferi katsayıları eşitlik (6) dan elde edilen zorlanmış konveksiyon ısı transferi katsayılarından daha düşük değerler alır. Debi azaldıkça aradaki fark büyümektedir. Ancak belirli bir debiden (Re_g = 12000) sonra bu kötüye gidiş durur ve birleşik konveksiyondaki ısı transferi katsayıları tekrar zorlanmış konveksiyon değerlerine yaklaşmaya başlar. Debinin daha da azalmasıyla, birleşik konveksiyondaki ısı transferi katsayıları zorlanmış konveksiyona göre artmaya devam ederek zorlanmış konveksiyonda elde edilebilecek ısı transferi katsayılarından daha büyük değerler alırlar.

Şekil 2-b nin incelenmesinden de görülebileceği gibi, ısı transferi katsayısı boyutsuz eksenel mesafe x/d ile değişmektedir. Beklendiği gibi, dış cidar sıcaklıklarının tepe yaptığı eksenel mesafelerde deneysel ısı transferi katsayıları bir minimum oluşturmaktadır. Serbest konveksiyon etkisinin ihmal edilebileceği şartlarda yapılan deneylerde, ısı transferi katsayısı yaklaşık ilk 5 ile 10 çap mesafesinden sonra değişmemiş, sabit kalmıştır. Ancak bu etkinin büyük olduğu durumlarda (birleşik konveksiyon) yapılan deneylerde ise kaldırma kuvvetleri hidrodinamik ve ısıl sınır tabaka gelişimini etkilemiş ve ısı transferi katsayısı, buna bağlı olarak da boru cidar sıcaklığı x/d ile değişmiştir. Kaldırma kuvvetlerinin hidrodinamik ve ısıl sınır tabaka gelişimini nasıl etkilediğini açıklayabilmek için daha önce de belirtildiği gibi kapsamlı hız, sıcaklık ve türbülans ölçümlerine ihtiyaç vardır.

Yukarıda sabit ısı akım şiddetinde debi değişiminin (2. gurup deneyler) ısı transferini nasıl etkilediğine ilişkin örnekler verildi. Benzer sonuçlar, debinin sabit olduğu ve ısı akım şiddetinin değiştirildiği deneylerden de (1. grup) elde edilmiştir. Sabit debi durumunda ısı akım şiddetinin arttırılmasının ısı transferi üzerine etkisi, sabit ısı akım şiddeti halinde debinin azaltılması ile aynı yöndedir.

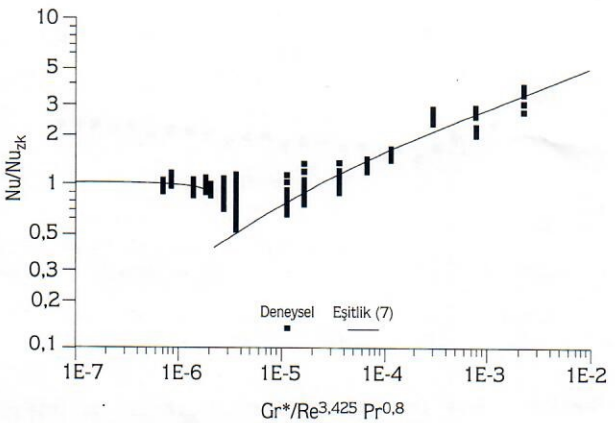
Her iki grup deney sonuçlarını birlikte inceleyebilmek için, elde edilen veri kaldırma kuvvetlerinin büyüklüğünü belirleyen bir parametreye göre ifade edilmelidir.

Literatürde bu amaç için kullanılan parametreler genellikle Gr/Re^2 veya $Gr/Re^m\ Pr^n$ şeklindedir. Bazı araştırmacılar Gr/Re^2 yerine Ra/Re^2 yi tercih etmişlerdir. Bu parametrelerde Re sayısı zorlanmış konveksiyonun büyüklüğünü, Grashof sayısı serbest konveksiyonun büyüklüğünü, Prandtl sayısı ise akışkan cinsini temsil etmektedir. Ancak Grashof sayısı değişik araştırmacılar tarafından farklı farklı tanımlanmıştır. İkinci türdeki parametrenin değişik bir şekli ilk olarak Jackson ve Hall (1979) tarafından fiziksel bir modele dayandırılarak ortaya atılmış ve daha sonra bu parametre geliştirilerek $Gr^*/Re^{3.425}\ Pr^{0.8}$ veya $Gr^*/Re^{3.3}\ Pr^{0.9}$ şeklini almıştır.

Deneylerden elde edilen sonuçlar, Nu/Nu_{zk} oranına karşı literatürde mevcut kaldırma kuvveti parametreleri şeklinde çizilmiş ve bunlar arasında veriyi ilişkilendirmesi açısından dikkate değer bir farkın olmadığı görülmüştür. Ancak fiziksel bir temele dayanması, mevcut bazı veri ve eşitliklerle karşılaştırma yapabilmeye imkan tanıması ve ayrıca zorlanmış konveksiyon ile serbest konveksiyonun zıt yönlerde olması durumu için de kullanılabilir olması sebebiyle, $Gr^*/Re^{3.425}Pr^{0.8}$ tercih edilmiştir (Şekil 3).

Daha önce bu parametreyi ortaya atan ve kullanan araştırmacılar, bu parametredeki Gr*, Re ve Pr sayılarını yerel ortalama akışkan sıcaklığında almışlardır. Deneysel bir çalışmada bu mümkün olmakla birlikte, pratikte sadece girişteki akışkan sıcaklığı bilinmektedir. Bundan dolayı, Şekil 3 te kaldırma kuvveti parametresi $Gr^*/Re^{3.425}\ Pr^{0.8}$ akışkan giriş sıcaklığında alınmıştır. Şekilde bütün eksenel mesafelerden elde edilen değerler gösterilmiştir.

Bu parametrenin veriyi iyi ilişkilendirmediği açıktır. Boru sıcaklığının belirli eksenel mesafelerde tepe yaptığı göz önüne alınırsa bu beklenen bir sonuçtur. Jack-



Şekil 3. Isı Transferi Katsayısı Oranının Kaldırma Kuvvetleri Parametresi ile Değişimi.

son ve Hall'ün (1979) fiziksel modeli akışın hidrodinamik ve ısıl olarak tam gelişmiş olduğu varsayımı üzerine kurulduğundan bu araştırmacılar tarafından önerilen parametrenin x/d etkisini dikkate alması beklenemez. Parametrenin içerisindeki büyüklüklerin yerel ortalama akışkan sıcaklığında alınması sonucu değiştirmemektedir. Diğer araştırmacılar tarafından kullanılan kaldırma kuvveti parametreleri de x/d etkisini dikkate almamaktadır.

Şekil 3 ten de görüldüğü gibi, kaldırma kuvveti parametresinin küçük değerlerinde serbest konveksiyonun etkisi ihmal edilebilecek mertebededir. Parametrenin artmasıyla birlikte ısı transferinin aynı akım koşullarında elde edilebilecek saf zorlanmış konveksiyon ısı transferine göre kötüleşmeye başladığı görülür. Ancak belirli bir noktadan ($\cong 4x10^{-6}$) sonra ısı transferi katsayısı artmaya başlar ve ($\cong 4x10^{-5}$) değerinde tekrar zorlanmış konveksiyon ile aynı seviyeye ulaşır. Bu noktadan sonra, ısı transferinde serbest konveksiyon daha etkili olmaya başlar ve kaldırma kuvvetleri ısı transferine daima arttırıcı yönde etki ederler. Deneylerde ulaşılan en büyük kaldırma kuvveti parametresinde, ısı transferi katsayısı zorlanmış konveksiyonda elde edilebilecek değerden yaklaşık üç kat daha büyüktür.

Nu/Nu_{zk} oranının yukarıda belirtilen şekildeki değişimi, boru cidarına yakın bir bölgede kayma gerilmesinde meydana gelen değişmeyle açıklanabilir: Isıtılmış boru cidarına yakın bir bölgede oluşan kaldırma kuvvetleri, bu bölgede kayma gerilmesini azaltmakta, bunun sonucu olarak da türbülans üretimi azalmaktadır. Türbülanstaki bu azalma türbülans difüzyonunu azaltmakta ve sonuçta ısı transferi kötüleşmektedir. Kaldırma kuvvetlerinin artmasıyla kayma gerilmesi azalmaya ve ısı transferi de kötüleşmeye devam etmektedir. Ancak, kaldırma kuvvetlerinin daha da büyük değerlere ulaşması ile boru cidarından uzak noktalarda, boru eksenine doğru kayma gerilmesi işaret değiştirerek, ters yönde tekrar artmaya başlamaktadır. Bu ise türbülans üretiminin ve sonuçta ısı transferi katsayısının tekrar iyileşmesine yol açmaktadır.

Kaldırma kuvvetlerinden dolayı akışın hız profilinde de bazı değişikler meydana gelmektedir. Ancak bunun ısı transferine etkisi, yukarıda bahsedilen kayma gerilmesinde meydana gelen değişikliklerin etkisinin yanında ihmal edilebilecek mertebededir (Yu, 1991).

Şekil 3 te ayrıca yine Jackson ve Hall'ün (1979) modelinden türetilen ve Rouai (1987) tarafından da kullanılan

$$\frac{Nu}{Nu_{zk}} = \left[1 - a\left(\frac{Gr^*}{Re^{3,425}Pr^{0,8}}\right)\left(\frac{Nu}{Nu_{zk}}\right)^{-2}\right]^{0,46} \qquad (7)$$

eşitliği de gösterilmiştir. Bu bağıntıdaki a katsayısı Rouai tarafından $8,3x10^4$ olarak alınmıştır. Yukarıda da belirtildiği gibi, bu ve buna benzer mevcut diğer eşitliklerdeki kaldırma kuvveti parametresi genellikle yerel ortalama akışkan sıcaklığında hesaplanmıştır. Bu çalışmada ise pratik hesaplamalara daha uygun olduğu düşüncesiyle girişteki akışkan özellikleri kullanılmıştır.

a katsayısının $7,5x10^4$ olması durumda eşitlik (7) nin mevcut verinin kaldırma kuvveti parametresi ile değişimini genel olarak yakaladığı görülür. Ancak, bu eşitlik x/d etkisini dikkate almadığından, sayısal olarak deneysel ve eşitlikten elde edilen değerler arasındaki fark birçok eksenel mesafede oldukça büyüktür.

Literatürde birleşik konveksiyon ısı transferi katsayısı için x/d etkisini dikkate alan eşitlikler sadece iki araştırmada mevcuttur. Bunlar Kapinos ve Remizov'un (1988) su ile ve Kaupas ve Poskas'ın (1991a, 1991b) hava ile olan çalışmalarıdır. Bununla birlikte Kapinos ve Remizov'un eşitliklerinde Grashof sayısı (dT_o/dx) e bağlı olarak tanımlandığından bu çalışmada dikkate alınmamıştır. Kaupas ve Poskas'ın (1991a) da önerdiği eşitliklerin geçerliliğini test edebilmek için mevcut veri onlar tarafından kullanılan kaldırma kuvveti parametresi ($Gr^*/4\ Re^3\ Pr$) cinsinden ifade edilmiş ve bu eşitliklerin mevcut veriyi temsil etmekten uzak olduğu görülmüştür.

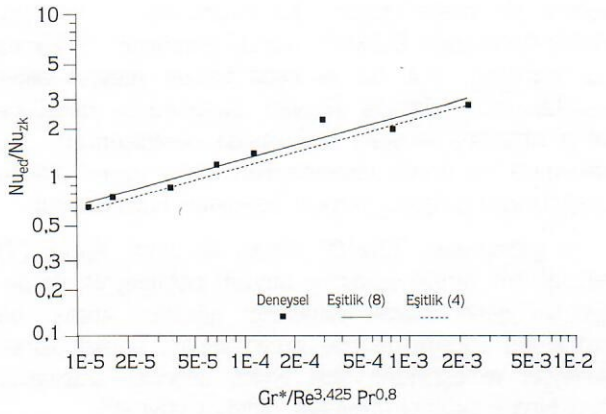
Tamamen yerel parametreleri kullanarak verinin ilişkilendirilmesindeki zorluktan dolayı, sadece cidar sıcaklık tepelerinin oluştuğu eksenel mesafelerdeki (x_t/d) ısı transferi katsayıları (Nu_{ed}) dikkate alınarak Şekil 4 de gösterilmiştir. Bu noktalardan en büyük %25 hata ile geçen doğru

$$\frac{Nu_{ed}}{Nu_{zk}} = 17\left(\frac{Gr^*}{Re^{3,425}Pr^{0,8}}\right)^{0,28} \qquad (8)$$

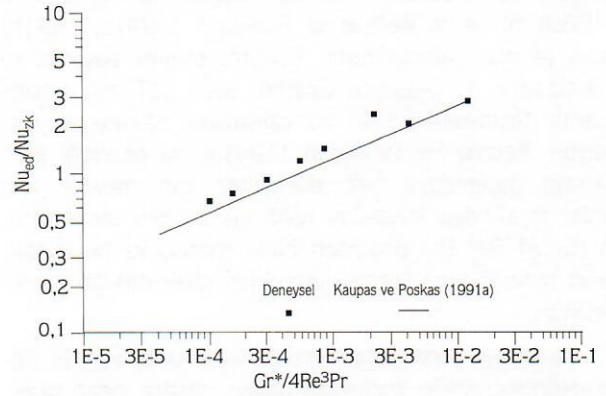
şeklindedir. Şekilde ayrıca Rouai (1987) tarafından verilen (4) nolu bağıntı da gösterilmiştir. Eşitlik (4) ve (8) arasında dikkate değer bir farkın olmadığı açıktır.

(8) eşitliğini Kenning ve arkadaşlarının (1974) bağıntısı (2) ile karşılaştırmak mümkün değildir. Çünkü eşitlik (8) de özellikler akışkan giriş sıcaklığında alınırken, eşitlik (2) de yerel film sıcaklığında alınmalıdır.

Şekil 5 de ise bu çalışmada elde edilen Nu_{ed}/Nu_{zk} oranları Kaupas ve Poskas (1991a) tarafından verilen eşitliklerden elde edilen değerlerle birlikte gösterilmiştir. Her ne kadar Kaupas ve Poskas tarafından verilen bağıntılar ile (8) nolu bağıntı farklı görünseler de, bu çalışmanın kaldırma kuvveti parametresi sınırları içeri-



Şekil 4. Sıcaklık Tepelerinin Oluştuğu Eksenel Mesafelerdeki Isı Transferi Katsayısının Kaldırma Kuvvetleri Parametresi ile Değişimi.

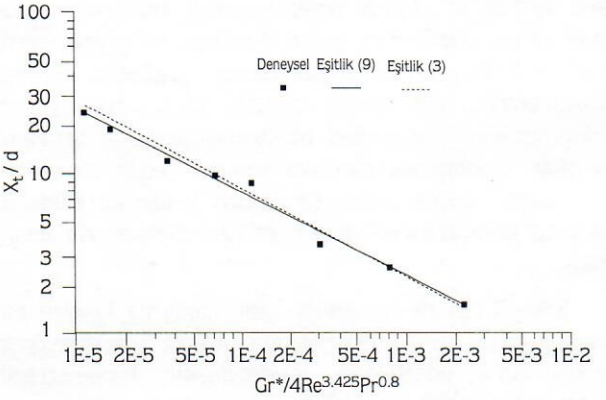


Şekil 5. Sıcaklık Tepelerinin Oluştuğu Eksenel Mesafelerdeki Isı Transferi Katsayısının Kaldırma Kuvvetleri Parametresi İle Değişimi.

sinde, Kaupas ve Poskas'ın eşitlikleri mevcut veriyle uyum içerisinde olduğundan bu eşitliklerin yaklaşık birbirine eşdeğer olduğu söylenebilir.

Deneylerin yapıldığı test borusu için sıcaklık tepeleri kaldırma kuvveti parametresinin $1x10^{-5}$ den büyük olması halinde oluşmuştur. Bu değer Kenning ve arkadaşları (1974) tarafından belirtilen sınırla ($Gr^*/Re^{3,4}\ Pr^{0,4} > 4x10^{-5}$) uyum içindedir. Kenning ve arkadaşlarının kullandığı kaldırma kuvveti parametresinin ($Gr^*/Re^{3,4}\ Pr^{0,4}$) mevcut parametreden en belirgin farkı Pr sayısının kuvvetidir. Mevcut deneylerde su giriş sıcaklığı sabit tutulduğu için Pr=7 alınırsa Kenning ve arkadaşları tarafından belirtilen sınır ($Gr^*/Re^{3,4} > 8,7x10^{-5}$) şeklinde ve mevcut sınır ($Gr^*/Re^{3,425} > 5x10^{-5}$) şeklinde yazılabilir.

Sıcaklık tepelerinin meydana geldiği eksenel mesafeler (x_t/d) Şekil 6 da verilmiştir. Kaldırma kuvveti parametresi kullanılarak bu mesafeler



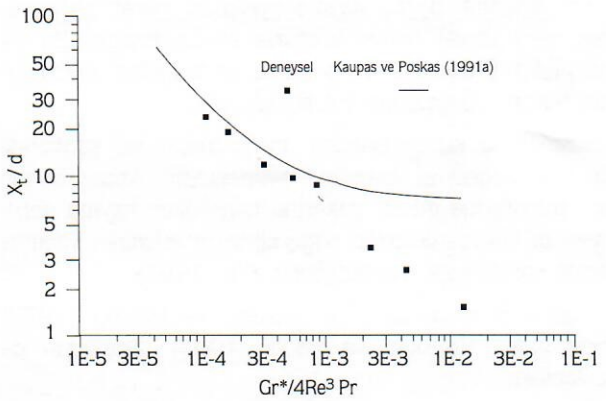
Şekil 6. Sıcaklık Tepelerinin Oluştuğu Boyutsuz Eksenel Mesafelerin Kaldırma Kuvvetleri Parametresi ile Değişimi.

$$\frac{x_t}{d} = 0,062 \left(\frac{Gr^*}{Re^{3,425}Pr^{0,8}}\right)^{-0,52} \qquad (9)$$

bağıntısıyla hesaplanabilir. Eşitlikte maksimum hata %20 civarındadır. Şekilde ayrıca (3) nolu eşitlik te gösterilmiştir. Mevcut kaldırma kuvveti parametresi sınırları içerisinde bu iki eşitlik arasındaki fark ihmal edilebilecek mertebededir.

Mevcut x_t/d değerleri $Re^3\ Pr^{1,2}/Gr^*$ parametresi cinsinden ifade edilerek Kenning ve arkadaşlarının (1974) önerdiği bağıntı (1) ile karşılaştırılmış ancak (1) in çok farklı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Benzer şekilde Kaupas ve Poskas (1991a) tarafından hava için önerilen bağıntının geçerliliğini test etmek için mevcut x_t/d değerleri $Gr^*/4Re^3\ Pr$ kullanılarak yeniden ifade edilmiş ve onlar tarafından verilen eşitlikle karşılaştırılmıştır (Şekil 7). Bu eşitliğin kaldır-



Şekil 7. Sıcaklık Tepelerinin Oluştuğu Boyutsuz Eksenel Mesafelerin Kaldırma Kuvvetleri Parametresi ile Değişimi.

ma kuvvetlerinin büyük olması durumunda ($Gr^*/4Re^3$ $Pr > 1x10^{-3}$) çok farklı değerler verdiği şekilden açıkca görülmektedir.

Sonuç

Birleşik konveksiyonda ısı transferi katsayısı, kaldırma kuvvetlerinin büyüklüğüne bağlı olarak aynı akım koşullarında elde edilebilecek zorlanmış konveksiyondan daha düşük veya daha yüksek olabilmektedir. Boru cidar sıcaklıklarında belirli eksenel mesafelerde tepeler oluştuğundan, birleşik konveksiyon ısı transferi katsayısı için x/d etkisini dikkate almayan genel bir eşitliğin elde edilmesi mümkün değildir. Bununla birlikte Jackson ve Hall'ün (1979) modelinden yola çıkılarak elde edilen (7) eşitliği, Nu/Nu_{zk} oranının kaldırma kuvvetlerinin büyüklüğünü ifade eden $Gr^*/Re^{3,425}$ $Pr^{0,8}$ parametresi ile değişimini genel olarak takip etmektedir.

Boru duvar sıcaklıklarındaki tepeler $Gr^*/Re^{3,425}$ $Pr^{0,8} > 1x10^{-5}$ olması durumunda meydana gelmektedir. Tepelerin oluştuğu eksenel mesafeler için (9) ve bu mesafelerdeki ısı transferi katsayısı için ise (8) bağıntısı elde edilmiştir.

Bu çalışmada bulunan ısı transferi katsayıları Rouai (1987) tarafından üretilen veriyle ve elde edilen bağıntılarla iyi bir uyum içerisindedir. Ancak Kaupas ve Poskas (1991a) tarafından ısı transferi katsayısı için önerilen ve x/d etkisini de dikkate alan eşitlikler bu çalışmada elde edilen veriyi yeniden üretememektedir.

Semboller

d : Boru çapı

g : Yer çekim ivmesi

Gr : Grashof sayısı { $= gd^3 (\rho_o-\rho_d) \rho_o/\mu^2$}

Gr* : Grashof sayısı { $= g\beta d^4 q_d/k\nu^2$}

k : Isı iletim katsayısı

Nu : Nusselt sayısı

Pr : Prandtl sayısı

q : Isı akım şiddeti

Ra_A : Rayleigh sayısı { $= (g\beta d^4 Pr/\nu^2)\ (dT_o/dx)$}

Re : Reynolds sayısı

T : Sıcaklık

x : Isıtma başlangıcından itibaren ölçülen eksenel mesafe

ß : Hacimsel genleşme katsayısı

μ : Vizkozite

ν : Kinematik vizkozite

p : Yoğunluk

Alt İndisler

d : duvar

ed : en düşük

g : giriş

o : ortalama

PK : Pekuthov-Kirillov

t : tepe

zk : zorlanmış konveksiyon

Kaynaklar

Brown, C. K. ve Gauvin, W. H., "Temperature Profiles and Fluctuations in Combined Free-and Forced-Convection Flows", Chem. Eng. Science, Vol. 21, 961-970, 1966.

Byrne, J. E. ve Ejiogu, E., "Combined Free and Forced Convection Heat Transfer in a Vertical Pipe", Symposium Heat and Mass Transfer by Combined Forced and Natural Convection, Inst. Mech. Engrs., Manchester, 40-46, 1971.

Carr, A. D., Connor, M. A. ve Buhr, H. O, "Velocity, Temperature, and Turbulence Measurements in Air for Pipe Flow with Combined Free and Forced Convection", Trans. ASME C, J. Heat Transfer, Vol. 95, 445-452, 1973.

Eckert, E. R. ve Diaguila, A. J., "Convective Heat Transfer for Mixed, Free and Forced Flow through Tubes", Trans. ASME, Vol. 76, 497-504, 1954.

Fewster, J. "Mixed Forced and Free Convective Heat Transfer to Supercritical Pressure Fluids Flowing in Vertical Pipes", Doktora tezi, University of Manchester, 1976.

Herbert, L. S. ve Sterns, U. J., "Heat Transfer in Vertical Tubes-Interactions of Forced and Free Convection", Chem. Eng. J., Vol. 4, 46-52, 1972.

Jackson, J. D. ve Hall, W. B., "Influences of Buoyancy on Heat Transfer to Fluids Flowing in Vertical Tubes Under Turbulent Conditions", Turbulent Forced Convection in Channels and Bundles: Theory and Applications to Heat Exchangers and Nuclear Reactors, Advanced Study Institute Book., Vol. 2, (editörler: Kakaç, S. ve Spalding, D. B.), 613-640, 1979.

Jackson, J. D., Cotton, M. A. ve Axcell B. P., "Studies of Mixed Convection in Vertical Tubes", Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 10 (1), 2-15, 1989.

Kapinos, G. A. ve Remizov, O. V., "The Effect of Free Convection on Heat Transfer with Turbulent Flow of Liquid in Vertical Tubes", Thermal Engineering, Vol. 35 (2), 104-106, 1988.

Kaupas, V. E. ve Poskas, P. S., "Heat Transfer in Transition Flow of Air at High Heat Fluxes", Heat Transfer-Soviet Research, Vol. 23 (1), 21-37, 1991a.

Kaupas, V. E. ve Poskas, P. S., "Effect of Variability of the Physical Properties of the Gas on Combined Convection Heat Transfer in Vertical Pipes", Heat Transfer-Soviet Research, Vol. 23 (3), 352-365, 1991b.

Kenning, D. B. R., Shock, R. A. W ve Poon, J. Y. M., "Local Reduction in Heat Transfer Due to Buoyancy Effects in Upward Turbulent Flow", Proc. 5th Int. Heat Transfer Conference, Tokyo, 139-143, 1974.

Petukhov, B. S., "Turbulent Flow and Heat Transfer in Pipes Under Considerable Effect of Thermograviational Forces", Heat Transfer and Turbulent Bouyant Convection, Seminar of Int. Centre for Heat and Mass Transfer, Dubrovnik, Yugoslavia, 1976 (editörler: Spalding, D. B. and Afgan, N), Hemisphere Publishing Co., Washington D. C., 1977.

Petukhov, B. S. ve Kirillov, V. V., "The Problem of Heat Exchange in the Turbulent Flow of Fluids in Tubes", Teploenergetika, Vol. 4, 63-68, 1958.

Petukhov, B. S. ve Strigin, B. K., "Experimental Investigation of Heat Transfer with Viscous Inertial-Gravitational Flow of a Liquid in Vertical Tubes", Teplofizika Vysokikh Temperatur, Vol. 6 (5), 933-937, 1968.

Polyakov, A. F. ve Shindin, S. A., "Development of Turbulent Heat Transfer over the Length of Vertical Tubes in the Presence of Mixed Air Convection", Int. J. Heat Mass Transfer,Vol. 31 (5), 987-992, 1988.

Rouai, N. M., "Influences of Buoyancy and Imposed Flow Transients on Turbulent Convective Heat Transfer in a Tube", Doktora tezi, University of Manchester, 1987.

Tanaka, H., Maruyama, S. ve Hatano, S., "Combined Forced and Natural Convection Heat Transfer for Upward Flow in a Uniformly Heated, Vertical Pipe", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 30 (1), 165-174, 1987.

Yu, L. S. L., "A Computational Study of Turbulent Mixed Convection in Vertical Tubes", Doktora tezi, University of Manchester, 1991.