

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ТУРБУЛЕНТНОЙ ОТРЫВНОЙ ОБЛАСТИ
ПРИ НАЛОЖЕННЫХ ПУЛЬСАЦИЯХ ВНЕШНЕГО ПОТОКА****АННОТАЦИЯ**

Представлены данные измерений коэффициента теплоотдачи в турбулентном отрывном течении за диафрагмой в круглом канале при наложенных пульсациях внешнего потока. Оказалось, что при постоянном среднем расходе теплоносителя наложенные пульсации расхода приводят к существенной интенсификации теплообмена в отрывной области по сравнению с режимом обтекания препятствия стационарным потоком ($Sh=0$). Наиболее высокий темп прироста коэффициента теплоотдачи соответствует диапазону частот пульсаций $Sh=0,5-1,5$. Возможно, что использование обнаруженного эффекта интенсификации теплообмена при отрыве пульсирующего потока позволит повысить эффективность интенсификаторов теплоотдачи для турбулентных потоков в каналах.

1. ВВЕДЕНИЕ

По теплообмену в турбулентной отрывной области в условиях стационарного течения накоплен обширный экспериментальный материал, обобщенный в [1]. Установлено, что максимум коэффициента теплоотдачи наблюдается вблизи точки присоединения потока, а величина этого максимума связана с числом Рейнольдса, определяющим размером в котором является расстояние между точками отрыва и присоединения потока.

В процессах переноса импульса и теплоты в отрывной области важную роль играет динамика взаимодействия со стенкой крупномасштабных вихрей, формирующихся в сдвиговом слое [2]. При обтекании препятствия пульсирующим потоком в некотором диапазоне частот механизм формирования этих вихрей весьма чувствителен к наложенной внешней нестационарности потока. Выявлен эффект почти двукратного скачкообразного уменьшения размеров турбулентной отрывной области в пульсирующем потоке по сравнению со стационарным случаем [3, 4].

В данной работе предпринята попытка экспериментального изучения конвективного теплообмена при отрыве пульсирующего потока.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для экспериментов выбран классический объект исследования – турбулентное отрывное течение за диафрагмой в круглом канале. Внутренний контур рабочего участка, режимы по числу Рейнольдса, амплитуде и частоте наложенных пульсаций потока воздуха полностью соответствовали условиям экспериментов [3], направленных на изучение структуры потока в отрывной области пульсирующего потока. Пульсации потока создавались с помощью вращающейся заслонки на выходе из канала.

Выступ высотой $h=12$ мм, образованный диафрагмой с отверстием диаметром 40 мм по острой передней кромке, установленной в относительно коротком канале диаметром 64 мм, обтекался потоком воздуха. Эксперименты выполнялись при стационарных условиях обтекания выступа и в диапазоне частот наложенных пульсаций потока $f=5-380$ Гц на трех режимах по расходу воздуха через рабочий участок. Диапазон

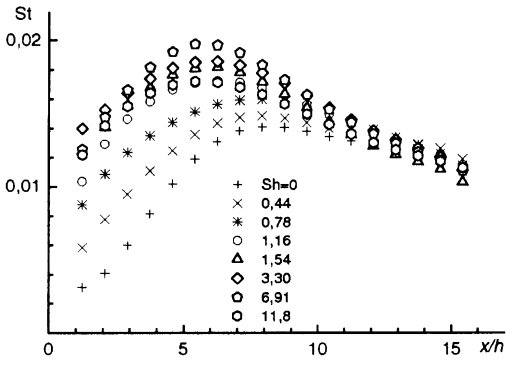
средней (по времени и по сечениям) скорости потока в экспериментах: на срезе диафрагмы $u_0 = 11,7-42,4$ м/с, в канале ниже точки присоединения потока $u_1 = 4,6-16,6$ м/с.

Пульсации скорости потока относительно среднего значения \bar{u} на оси канала вблизи диафрагмы, измеренные с помощью термоанемометра, оказались близкими к гармоническим $u/\bar{u} = 1 + \beta \sin(2\pi ft + \varphi)$. На каждом из режимов по расходу средняя скорость потока поддерживалась постоянной во всем диапазоне частот наложенных пульсаций, но относительная амплитуда пульсаций скорости потока β из-за различной степени близости к резонансу потока в канале в диапазоне частот изменялась в пределах от 0,2 до 0,35.

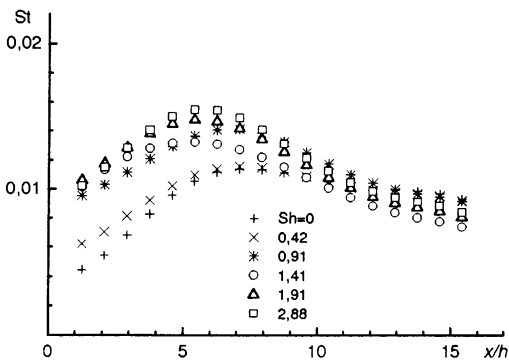
В экспериментах воздух комнатной температуры поступал в предварительно нагретый рабочий участок. Коэффициент теплоотдачи определялся методом обратной нестационарной задачи теплопроводности стенки [5] по результатам измерения динамики ее температурного поля с помощью 24 термопар. Методика экспериментов подробно описана в работе [6].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные данные по теплообмену в отрывной области за диафрагмой, полученные при крайних значениях расхода воздуха из исследованного диапазона, представлены на рис.1. Отметим, что для стационарного режима полученные в экспериментах максимальные для отрывной области значения коэффициента теплоотдачи в исследованном диапазоне Re находятся практически в центре распределения данных многих авторов, обобщенных в [1]. Условные обозначения параметров в числах Стантона $St = \alpha/c_p r u_1$, Рейнольдса $Re = u_1 x_R / \nu$ и Струхалия $Sh = f x_R / u_1$ – традиционные. За определяющий размер принято расстояние между точками отрыва и среднего положения присоединения потока x_R . В экспериментах [3] выявлено почти двукратное изменение координаты точки присоединения потока в исследованном диапазоне частот пульсаций потока, но в данной работе для удобства в числах Re и Sh использовано постоянное значение $x_R = 12h$, измеренное на режиме стационарного потока.



а)



б)

Рис.1. Распределение коэффициента теплоотдачи в отрывной области пульсирующего потока: а – $Re=45\,000$; б – $Re=163\,000$

Как видно из рис. 1, при постоянном среднем расходе теплоносителя пульсация потока приводят к существенной интенсификации теплообмена в отрывной области по сравнению с режимом обтекания препятствия стационарным потоком ($Sh=0$). Наиболее высокий темп прироста коэффициента теплоотдачи соответствует диапазону частот пульсаций $Sh=0,5-1,5$. При больших частотах интенсивность теплообмена в отрывной области практически стабилизируется с тенденцией к снижению в области высоких Sh . Такое изменение St по частоте пульсаций внешнего потока согласуется с выявленной [3] зависимостью $x_R/h(Sh)$.

Эффект интенсификации теплообмена при обтекании препятствия пульсирующим потоком существенно изменяется по длине отрывной области. Наибольшее относительное повышение St (в 3–4 раза) по отношению к значениям при стационарном потоке достигается в ближней зоне за препятствием, а в окрестности и ниже точки присоединения стационарного потока прирост теплообмена полностью исчезает. Изменение координаты максимума St на оси x соответствует перемещению точки присоединения пульсирующего потока ближе к препятствию [3]. Отношение максимумов St в отрывной области при пульсациях потока и стационарном режиме в исследованном диапазоне Re

остаётся приблизительно постоянным (рис.2) и составляет 1,35–1,40.

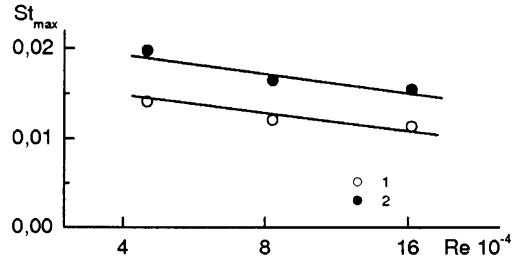


Рис.2. Зависимость максимального коэффициента теплоотдачи в отрывной области стационарного (1) и пульсирующего (2) потока от числа Рейнольдса

Поскольку в отрывных течениях $St \sim Re^{-0.28}$ [1], эффект интенсификации теплообмена при отрыве пульсирующего потока частично вызван, но полностью не объясняется практически двукратным уменьшением длины отрывной области. Фактический прирост St в области максимального теплообмена вдвое выше оценки влияния на теплообмен этой длины, а в ближней зоне за препятствием коэффициент теплоотдачи вообще повышается многократно.

В основе механизма интенсификации теплообмена лежит формирование в сдвиговом слое пульсирующего потока мощных крупномасштабных вихрей, усиливающих массообмен между внешним потоком и отрывной областью. Обновляясь в каждом цикле пульсаций, эти вихри возмущают пристеночное течение в отрывной области и доставляют в нее свежие порции теплоносителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаруженный эффект интенсификации теплообмена при отрыве пульсирующего потока открывает новые возможности по управлению процессами турбулентного переноса. Возможно, что использование этого эффекта позволит повысить эффективность интенсификаторов теплоотдачи [7] для турбулентных потоков в каналах.

Работа поддержана РФФИ (проскты №07-08-00330, 08-08-12181-офи, 09-08-00597-а) и грантом Президента РФ НШ-4334.2008.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леонтьев А.И., Ивин В.И., Грехов Л.В. Полуэмпирический способ оценки уровня теплообмена за точкой отрыва пограничного слоя // ИФЖ. 1984. Т.47. №4. С.543-550.
2. Михеев Н.И. Динамика пространственных полей поверхностного трения в турбулентном отрывном течении // Доклады Академии наук. 1999. Т.364. №4. С.479-482.
3. Давлетшин И.А., Михеев Н.И., Молочников В.М. Отрыв пульсирующего потока // Доклады Академии наук. 2007. Т. 417. №6. С.1-4.
4. Mikheev N.I., Davletshin I.A., Faskhutdinov R.E., and Dushina O.A. Separation region downstream of an orifice in a pulsating flow // Heat Transfer Research. 2008. Vol.39. No.2. P.175-182.
5. Михеев Н.И., Давлетшин И.А. Метод измерения осредненных значений коэффициента теплоотдачи в сложных течениях // Известия РАН. Энергетика. 2005. №6. С.16-19.

6. Давлетшин И.А., Михеев Н. И., Молочников В. М. Теплообмен в турбулентной отрывной области при наложенных пульсациях потока // Теплофизика и аэромеханика. 2008. № 2. С. 1-9.

7. Леонтьев А.И., Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В., Попов И.А. Эффективные интенсификаторы теплоотдачи для ламинарных (турбулентных) потоков в каналах энергоустановок // Известия РАН. Энергетика. 2005. №1. С.75-91.

SUMMARY

N.S. Dushin, N.I. Miheev, V.M. Molochnikov, I.A. Davletshin, P.S. Zanko, G.V. Stinskiy
(Power Engineering Department, Kazan Science Center, Russian Academy of Sciences,
420111, Kazan, Lobechevskiy Str., 2/31)

HEAT TRANSFER AUGMENTATION IN TURBULENT SEPARATED REGION OF PULSATING FLOW

Experimental data on heat exchange coefficient in a turbulent separated flow behind an orifice in a round pipe under imposed pulsations of the external flow are presented. It is shown that (when the mean flow rate of a heat carrier is constant) imposed flow rate pulsations lead to essential heat transfer augmentation in the separated region in comparison with the corresponding stationary flow ($Sh=0$). The highest increase of the heat exchange coefficient corresponds to the pulsations frequency range of $Sh=0,5-1,5$. Use of the discovered heat transfer augmentation effect in separated pulsating flows may increase efficiency of heat exchange augmentation techniques in turbulent channel flows.

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

*XVII Школы-семинара молодых ученых и специалистов
под руководством академика РАН А.И. Леонтьева*

ПРОБЛЕМЫ ГАЗОДИНАМИКИ И ТЕПЛОМАССОБМЕНА В АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЯХ

*25 – 29 мая 2009 года
г. Жуковский, Россия*

Школа-семинар посвящается 90-летию
Центрального аэрогидродинамического института
им. профессора Н.Е. Жуковского

Москва

Издательский дом МЭИ

2009

УДК 533.6:536.24:629.78
ББК 22.253:31.31:30.6
Т 299

Т 299 **Тезисы докладов XVII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в аэрокосмических технологиях». 25—29 мая 2009 г., г. Жуковский. — М.: Издательский дом МЭИ, 2009. — 416 с.**

ISBN 978-5-383-00390-9

Представлены тезисы докладов по проблемам газодинамики и теплообмена при внешнем обтекании в проточных трактах, тепловой защиты, высокотемпературных материалов, отрывных течений. Рассмотрены вопросы аэрофизики излучающих газов и дисперсных потоков, управления течением и т.д.

Тезисы публикуются путем прямого репродуцирования авторских оригиналов в авторской редакции.

УДК 533.6:536.24:629.78
ББК 22.253:31.31:30.6

ISBN 978-5-383-00390-9

© Составление: Национальный комитет РАН
по тепломассообмену, 2009

УДК 536.24+532.5

*Н.С. Душин, Н.И. Михеев, В.М. Молочников, И.А. Давлетшин, Ф.С. Занько,
Г.В. Стинский*

Исследовательский центр проблем энергетике Казанского научного центра РАН,
420111, г. Казань, Лобачевского, 2/31

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ТУРБУЛЕНТНОЙ ОТРЫВНОЙ ОБЛАСТИ ПРИ НАЛОЖЕННЫХ ПУЛЬСАЦИЯХ ВНЕШНЕГО ПОТОКА

В данной работе предпринята попытка экспериментального изучения конвективного теплообмена при отрыве пульсирующего потока. В качестве объекта исследования было выбрано турбулентное отрывное течение за диафрагмой в круглом канале. Внутренний контур рабочего участка, режимы по числу Рейнольдса, амплитуде и частоте наложенных пульсаций потока воздуха полностью соответствовали условиям экспериментов [1], направленных на изучение структуры потока в отрывной области пульсирующего потока. Пульсации потока создавались с помощью вращающейся заслонки на выходе из канала.

Выступ высотой $h=12$ мм, образованный диафрагмой с отверстием диаметром 40 мм по острой передней кромке, установленной в относительно коротком канале диаметром 64 мм, обтекался потоком воздуха. Эксперименты выполнялись при стационарных условиях обтекания выступа и в диапазоне частот наложенных пульсаций потока $f=5-380$ Гц на трех режимах по расходу воздуха через рабочий участок. Диапазон средней (по времени и по сечениям) скорости потока в экспериментах: на срезе диафрагмы $u_0=11,7-42,4$ м/с, в канале ниже точки присоединения потока $u_1=4,6-16,6$ м/с.

В экспериментах воздух комнатной температуры поступал в предварительно нагретый рабочий участок. Коэффициент теплоотдачи определялся методом обратной нестационарной задачи теплопроводности стенки [2] по результатам измерения динамики ее температурного поля с помощью 24 термопар. Методика экспериментов подробно описана в работе [3].

Оказалось, что при постоянном среднем расходе теплоносителя пульсации потока приводят к существенной интенсификации теплообмена в отрывной области по сравнению с режимом обтекания препятствия стационарным потоком ($Sh=0$). Наиболее высокий темп прироста коэффициента теплоотдачи соответствует диапазону частот пульсаций $Sh=0,5-1,5$. При больших частотах интенсивность теплообмена в отрывной области практически стабилизируется с тенденцией к снижению в области высоких Sh .

Эффект интенсификации теплообмена при обтекании препятствия пульсирующим потоком существенно изменяется по длине отрывной области.

Наибольшее относительное повышение St (в 3–4 раза) по отношению к значениям при стационарном потоке достигается в ближней зоне за препятствием, а в окрестности и ниже точки присоединения стационарного потока прирост теплообмена полностью исчезает. Изменение координаты максимума St на оси x соответствует перемещению точки присоединения пульсирующего потока ближе к препятствию [1]. Отношение максимумов St в отрывной области при пульсациях потока и стационарном режиме в исследованном диапазоне Re остается приблизительно постоянным и составляет 1,35–1,40.

По-видимому, эффект интенсификации теплообмена при отрыве пульсирующего потока частично вызван, но полностью не объясняется, практически двукратным уменьшением длины отрывной области. Фактический прирост St в области максимального теплообмена вдвое выше оценки влияния на теплообмен этой длины, а в ближней зоне за препятствием коэффициент теплоотдачи вообще повышается многократно.

В основе механизма интенсификации теплообмена лежит формирование в сдвиговом слое пульсирующего потока мощных крупномасштабных вихрей, усиливающих массообмен между внешним потоком и отрывной областью. Обновляясь в каждом цикле пульсаций, эти вихри возмущают пристеночное течение в отрывной области и доставляют в нее свежие порции теплоносителя.

Обнаруженный эффект интенсификации теплообмена при отрыве пульсирующего потока открывает новые возможности по управлению процессами турбулентного переноса. Возможно, что использование этого эффекта позволит повысить эффективность интенсификаторов теплоотдачи для турбулентных потоков в каналах.

Список литературы

1. Давлетшин И.А., Михеев Н.И., Молочников В.М. Отрыв пульсирующего потока // Доклады Академии наук. 2007. Т.417. №6. С.1-4.
2. Михеев Н.И., Давлетшин И.А. Метод измерения осредненных значений коэффициента теплоотдачи в сложных течениях // Известия РАН. Энергетика. 2005. №6. С. 16-19.
3. Давлетшин И.А., Михеев Н.И., Молочников В.М. Теплообмен в турбулентной отрывной области при наложенных пульсациях потока // Теплофизика и аэромеханика. 2008. № 2. С.1-9.

*N.S. Dushin, N.I. Miheev, V.M. Molochnikov,
I.A. Davletshin, P.S. Zanko, G.V. Stinskiy*

Power Engineering Department, Kazan Science Center, Russian Academy of Sciences,
420111, Kazan, Lobechevskiy Str., 2/31

HEAT TRANSFER AUGMENTATION IN TURBULENT SEPARATED REGION OF PULSATING FLOW