УДК 536.242

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАКРУТКИ И ВНЕШНИХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПОТОКА НА ТЕПЛООБМЕН В ИМПАКТНОЙ СТРУЕ

Маркович Д. М., Небучинов А.С.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

АННОТАЦИЯ

Целью работы является исследование влияния различных степеней закрутки и частот внешнего возмущения потока на интенсивность теплообмена в импактной струе.

В работе проведен цикл экспериментов по исследованию осесимметричной струи, натекающей нормально на нагреваемую поверхность. Струя находилась как в естественных условиях, так и при закрутки потока (S = 0.4; 0.7; 1.0) и внешнем периодическом возбуждении на различных частотах (Sh= 0; 0.5; 0.9). Показано, что интенсивность теплообмена на нагреваемой поверхности в закрученной струе меняет свой характер и на малых расстояниях между соплом и нагреваемой поверхностью с внесением закрутки потока локально возрастает. Внешние периодические колебания на различных частотах мало влияют на теплообмен закрученной струи.

ВВЕДЕНИЕ

Струйные течения, ограниченные твердыми поверхностями, являются одной из наиболее часто встречающихся форм организации эффективного тепломассообмена. Причина этого – с одной стороны, в удобстве и простоте технической реализации струйных тепломассообменных аппаратов, а с другой – в чрезвычайно высокой интенсивности процессов переноса, обеспечивающейся особенностями, присущими струйным течениям.

Широта применения ограниченных струйных течений обуславливает необходимость изучения фундаментальных физических эффектов и явлений, их сопровождающих.

С точки зрения практической значимости интерес представляют методы, позволяющие получить равномерный, но при этом интенсивный унос тепла со стенки. С этой стороны интерес представляют импактные струи с закруткой потока. При использовании закрутки потока турбулентная структура струи значительно изменяется. В зависимости от степени закрутки и способа ее создания наблюдаются различные режимы течения: вихревые кольца существуют при отсутствии и при незначительной закрутке потока; спиральные вихри различных масштабов возникают при более интенсивной закрутке. Закрутка потока многими авторами рассматривается как один из наиболее эффективных методов пассивного управления потоком.

Предполагается, что организация таких струй позволит получить высокие и равномерные по поверхности коэффициенты теплообмена. Внешнее возмущение закрученного потока также приводит к существенному изменению турбулентных характеристик струи, что, в свою очередь должно сказываться на интенсивности теплообмена со стенкой. Информация о влиянии внешнего возбуждения закрученного потока на характеристики струи и на интенсивность теплообмена отсутствует в настоящее время.

© Маркович Д. М., Небучинов А.С.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперимент с импактной струей проводился на установке, которая представляет собой замкнутый гидродинамический контур, состоящий из рабочего участка с исследуемым объектом, системы трубопроводов, расходомера, термостата, насоса, вибратора (рис.1.). Общий объём рабочей жидкости 300 литров. Стенки рабочего участка были выполнены из оргстекла, толщиной ≈20 мм. Внутренние геометрические размеры рабочего объема – 1×0.5×0.5м.

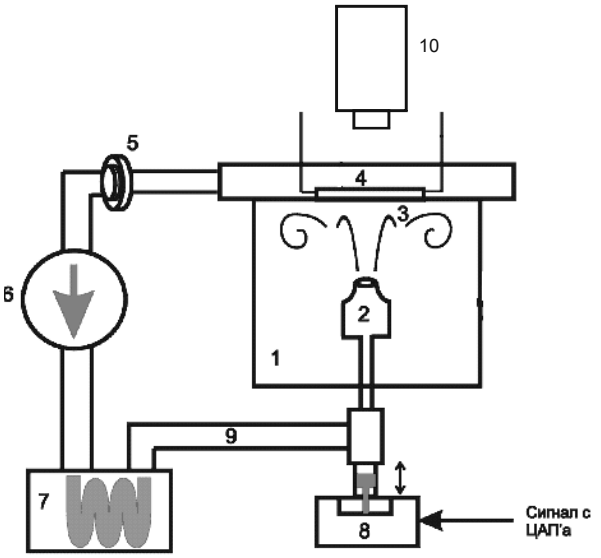

Рис.1 Схема установки с тепловизором. 1 – рабочий объём, 2 – сопло Витошинского (D = 15 мм), 3 – преграда, 4–нагревательный элемент, 5 – расходомер, 6 – насос, 7 – термостат, 8 – источник внешнего возбуждения - вибратор, 9 – трубопровод, 10 - тепловизор.

Объект исследования - осесимметричная импактная затопленная струя, ориентированная вертикально. Сопло имеет форму, рассчитанную по профилю Витошинского с диаметром на срезе сопла D=15 мм. Число Рейнольдса во всех экспериментов составляло Re=10000. Нагревательный элемент, представляет собой фольгу из нержавеющей стали (толщина 0.03 мм, площадью 15x15 см^2), приклеенной на текстолитовое основание. Нагрев фольги проводился при помощи программируемого источника питания постоянного тока PSH-10100 фирмы INSTEK мощностью до 1000Вт. Точность задания тока (в режиме стабилизации тока) ≈ 0.16A Возмущения потока создавались при помощи электромагнитного вибратора. Вибратор создавал периодические колебания расхода на срезе сопла заданной амплитуды и частоты. Подаваемые возмущения предполагались одномерными, так как вся механическая вибрационная система была осесимметричной. Для определения амплитуды возбуждения использовалась нормированная величина интенсивности пульсаций аксиальной скорости $a_f=(u'_0/U_0)x100\%$ на срезе сопла в зависимости от мощности, подаваемой на вибратор. Для определения амплитуды величина u'_0 определялась как среднее значение u' в области r/d < 0.4. Во всех экспериментах a_f≈10%. При отсутствии возбуждения, для свободной струи уровень естественных пульсаций составлял a_0=3.5%. Скорость и пульсации струи измерялись при помощи методики PIV.

Закрутка потока была организованна при помощи завихрителей с различными углами атаки, помещаемых в выходной участок сопла. Указанное число S рассчитывается из геометрии завихрителя по формуле (1) и используется только для обозначения условия эксперимента

$$S=\frac{2}{3}\left(\frac{1-\left(d_1/d_2\right)^3}{1-\left(d_1/d_2\right)^2}\right)\tan\left(\varphi\right) \qquad (1)$$

Где d_1 = 7 мм – это диаметр центрального тела поддерживающего лопатки, d_2 = 27 мм – это внешний диаметр завихрителя, и φ - это угол наклона лопаток. В данной работе использовались завихрители, соответствующие следующим значениям крутки: S = 0.4; 0.7 и 1.0.

Важным условием эксперимента является термостабилизация всего гидродинамического контура. Постоянная температура в системе поддерживалась при помощи термостата, использующего термометр сопротивления. Температура задавалась с точностью ≈ 0.1° C.

Измерения температуры на нагреваемой поверхности проводились с помощью тепловизионной камеры FLIR Titanium 550M, которая закреплялась сверху нагревателя и фиксировала температуру на внешней стороне фольги нагревательного элемента.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В работе измерялось распределение температуры на нагреваемой поверхности с помощью тепловизора, что позволило посчитать распределение числа Нуссельта на прегради при различных режимах истечения струи, расстояниях от среза сопла до импактной поверхности, степени закрутки и при разных частотах внешнего возмущения потока. В данных экспериментах для каждого режима было проведено 2000 реализаций мгновенной температуры, по которым проводилось усреднение. Нагревательный элемент во всех экспериментах выделял постоянный поток тепла q=0.7 Вт/см^2.

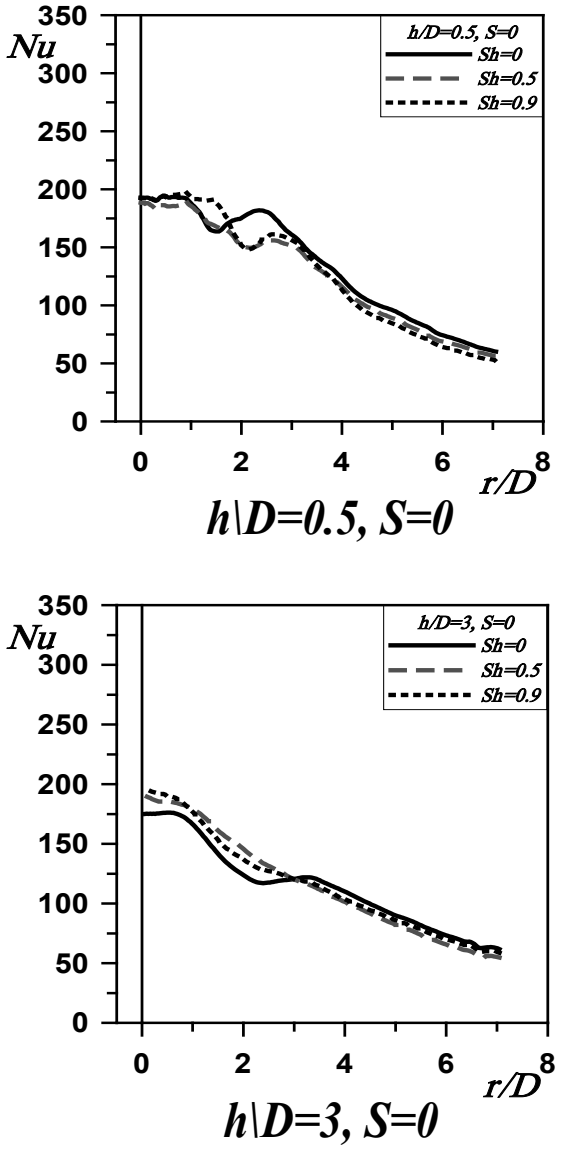

Рис.2 Распределение числа Nu в зависимости от Sh. Незакрученная струя. (а) h/D=0.5; (б) h/D=3.

Первый эксперимент проводился в отсутствии закрутки потока при трех расстояниях между нагреваемой поверхностью и соплом h/D=0.5; 1; 3 и трех разных условиях внешнего периодического возбуждения Sh=0; 0.5; 0.9. с одинаковой амплитудой на всех частотах a_f≈10%.

На рис.2 (а, б) представлены распределения числа Нуссельта Nu для незакрученной струи для h/D=0.5 и h/D=3.

На малых расстояниях между срезом сопла и преградой h/D=0.5 в невозмущенном случае, распределение интенсивности имеет характерный вид. На оси струи наблюдается локальный минимум коэффициента теплообмена. В области натекания крупномасштабных вихрей на преграду (r/D≈0.8) наблюдается максимум, а на расстоянии порядка 2-ух калибров от оси сопла (r/D≈2.2) наблюдается вторичный локальный максимум числа Нуссельта из-за турбулизации пограничного слоя на этих расстояниях и, как следствие, интенсификация уноса тепла. Далее, по мере удаления от оси сопла, коэффициент теплообмена монотонно спадает. При внесении возмущения на частоте Sh=0.5 интенсивность теплообмена уменьшается во всей области, и эффект вторичного максимума ослабевает. А возмущая поток на частоте Sh=0.9, теплообмен усиливается в области до r/D=2, а на расстояниях r/D=2 − 7 коэффициент Нуссельта меньше, чем в невозмущенном состоянии.

При больших расстояниях между соплом и импактной поверхностью h/D=3 эффект вторичного максимума в случае без внешнего возбуждения выражен меньше, чем при h/D=0.5. При внесении возмущения в поток интенсивность теплообмена усиливается в области r/D=0 − 3.3.

На рис.3 представлены распределения числа Нуссельта в зависимости расстояния между нагреваемой поверхностью и срезом сопла (h/D=0.5−5.5). Струя находится в невозмущенном состоянии, в отсутствии закрутки потока.

При увеличении расстояния от среза сопла до стенки распределения коэффициентов тепломассообмена принимают другой вид, монотонно спадая по мере удаления от критической точки.

Также видно, что средний теплообмен на нагревательном элементе уменьшается с увеличением расстояния до него. Причём не во всей области натекания струи на преграду, а в зоне r/D=1-5, где наблюдается наиболее интенсивное подавление Nu.

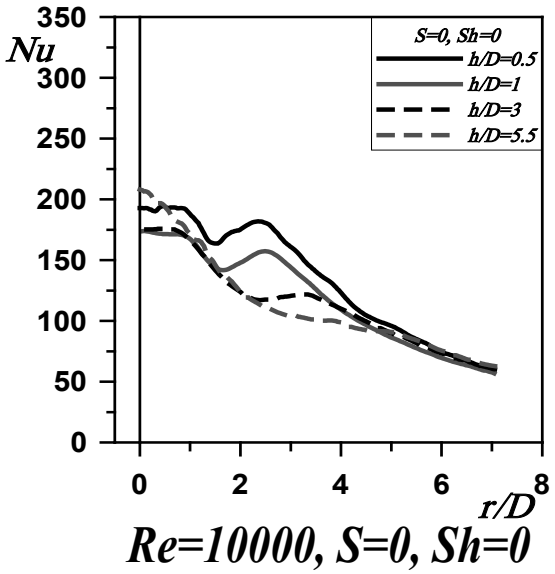

Рис.3 Распределение числа Nu в зависимости от h/D.

Следующая часть экспериментов относится к изучению влияния закрутки потока на интенсивность теплообмена для различных степеней закрутки (S=0.4; 0.7; 1) и разных расстояниях между нагреваемой поверхностью и срезом сопла (h/D=0.5; 1; 3; 5.5).

На рис.4 (а, б, в) представлены результаты для трех расстояний между стенкой и соплом h/D=0.5; 1; 5.5.

Видно, что внесение закрутки радикально меняет характер распределения интенсивности теплообмена на нагреваемой поверхности по сравнению с прямоточной струей. Для закрученной струи при малых расстояниях между соплом и преградой характерно наличие зоны рециркуляции в полть до импактной поверхности, даже при малой степени закрутки. На оси струи находится локальный минимум. Далее идёт значительное увеличение коэффициентов теплообмена до r/D≈1.4, где находится локальный максимум и после плавное ослабевание интенсивности по мере удаления от оси сопла. На этих h/D внесение закрутки интенсифицирует теплообмен в области r/D=0.5−3.

Разница интегральных значений числа Нуссельта закрученной струи и прямоточной достигает 19% при h/D=0.5 и 12.5% при h/D=1.

Увеличивая расстояние между нагреваемой поверхностью и соплом, интенсивность теплопередачи ослабевает во всей области, и становится меньше, чем в прямоточной струе, как показано на Рис.4(в) при h/D=5.5. Это происходит вследствие торможения закрученного потока за счёт смешения струи с внешней средой.

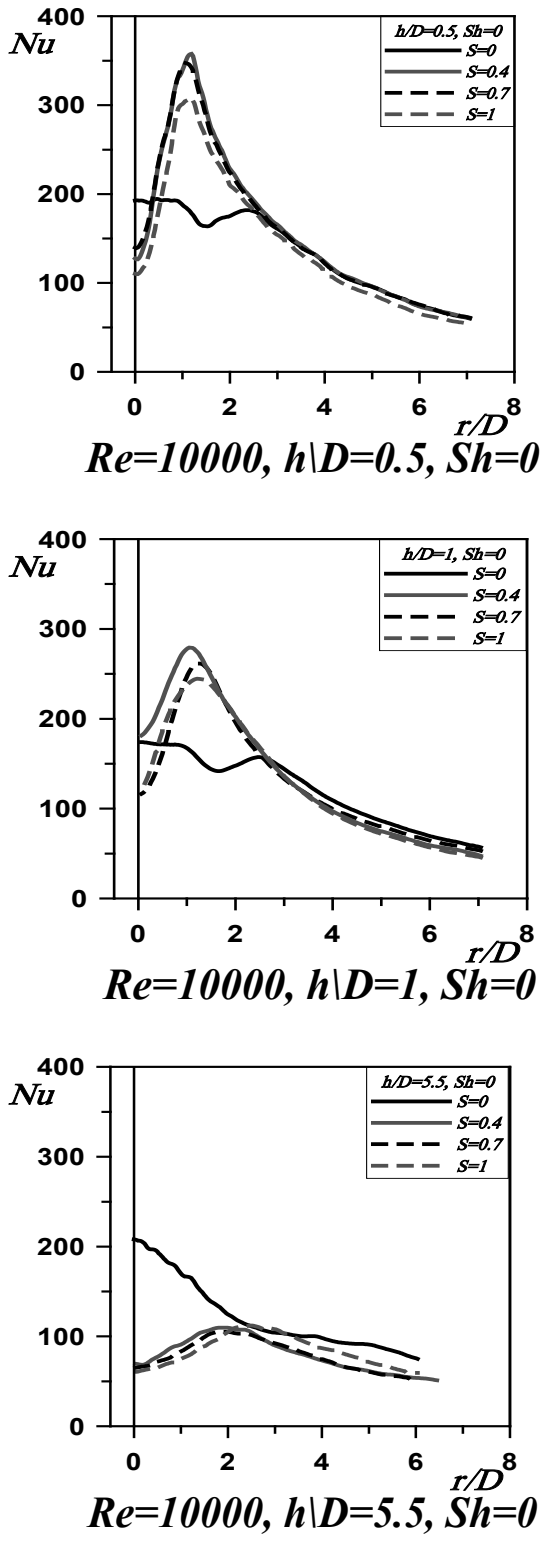

Рис.4 Распределение числа Nu в зависимости от S. (а) h/D=0.5; (б) h/D=1; (в) h/D=5.5.

Также видно, что теплообмен уменьшается с увеличением степени закрутки.

В следующем эксперименте изучалось влияние расстояния между соплом и стенкой на интенсивность теплообмена в закрученной струе (S=0.4; 0.7; 1).

На рис.5 представлен результат, характерный для всех степеней закрутки.

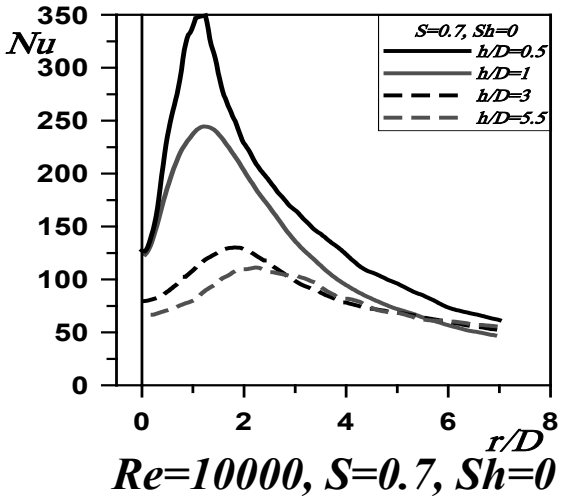

Рис.5 Распределение числа Nu в зависимости от h/D; S=0.7.

При увеличении h/D интенсивность теплообмена снижается существенно.

Следующие представленные результаты показывают влияние частоты внешнего периодического возмущения закрученной струи на интенсивность теплообмена.

Эксперимент проходил при трех разных степенях закрутки (S=0.4; 0.7; 1), частот внешнего возбуждения (Sh=0; 0.5; 0.9) и при трех расстояниях между преградой и соплом (r/D=0.5; 1; 3). Амплитуда возмущения во всех случаях составляла $a_f \approx 10\%$.

На рис.6 и рис.7 показаны характерные случаи влияния частоты внешнего возмущения закрученной струи на теплообмен.

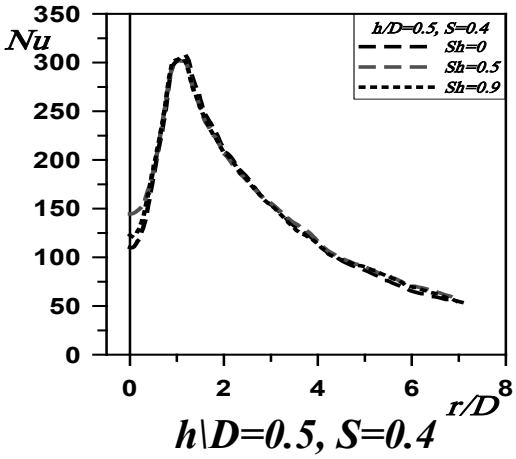

Рис.6 Распределение числа Nu в зависимости от Sh; S=0.4; h/D=0.5.

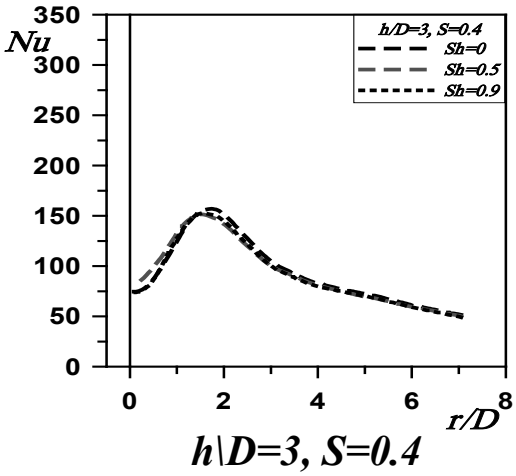

Рис.7 Распределение числа Nu в зависимости от Sh; S=0.4; h/D=3.

Видно, что внесенные в поток возмущения практически не влияют на интенсивность теплообмена даже при малых степенях закрутки. Это говорит о том, что, во-первых, закрученный поток малочувствителен к внешнему возмущению, во-вторых, в эксперименте была реализована недостаточная амплитуда периодического возбуждения потока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Объектом исследования в работе являлась осесимметричная импактная струя, натекающая нормально на нагреваемую поверхность, как прямоточная, так и закрученная. Струя находилась как в естественных условиях, так и в условиях внешнего возбуждения при различных расстояний между преградой и срезом сопла, частотах внешнего возмущения потока.

Проведены измерения распределения Nu на нагреваемой поверхности при различных режимах истечения струи, закрутки и режимов внешнего возмущения потока. Показано, что на

малых расстояниях между соплом и нагреваемой поверхностью с внесением закрутки потока интенсивность теплообмена локально возрастает.

Также показано, что внешнее периодическое возмущение с амплитудой $a_f \approx 10\%$ мало влияет на теплообмен в закрученной импактной струе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Liu T., Sullivan J.P., Heat transfer and flow structure in an excited circular impinging jet, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 39, No 17, 1996, pp. 3695-3706. 401 – 410.
2. Atsushi Nozaki, Yasumitsu Igarashi, and Koichi Hishida “Heat Transfer Mechanism of a Swirling Impinging Jet in a Stagnation Region”, Heat Transfer—Asian Research, 32 (8), 2003
3. L. Huang and M. S. El-Genk “Heat transfer and flow visualization experiments of swirling, multi-channel, and conventional impinging jets”, Ini. J. Heal Mass Transfer. Vol. 41, No. 3, pp. 583-600, 1998
4. S. Roux1, L.-E. Brizzi, E. Dorignac and M. Fenot “Impinging jet heat transfer improvement using acoustic forcing”, Turbulence, Heat and Mass Transfer 6, 2009 Begell House, Inc