

СТРУКТУРНО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ТЕПЛООТДАЧИ В ГАЗОВЫХ ПРИСТЕННЫХ СТРУЯХ

Экспериментально обнаружены специфические когерентные структуры, возникающие в тонких газовых пристенных струях. Установлена роль этих гидродинамических образований в процессе теплообмена турбулентного потока с поверхностью твердого тела.

Одним из более распространенных видов защиты поверхности твердого тела от воздействия высокотемпературных потоков является газовое пленочное охлаждение в виде тонкослойного струйного течения, вытекающего из плоской щели малой (≤ 5 мм) высоты (см. рис. 1). Управление этим процессом, повышение его эффективности является актуальной научно-технической задачей.

Влияние различных характеристик течения в целом и его локальных параметров на гидродинамику и теплообмен с поверхностью тела достаточно подробно обсуждается в [1-3]. Однако механизм теплоотдачи не вполне ясен, что, по-видимому, объясняется отсутствием полноценного представления о структурно - гидродинамических факторах процесса.

Особенность гидродинамической ситуации в данном случае заключается в том, что кроме пристенного слоя, собственно определяющего теплообмен газа с поверхностью, формируется внешний пограничный слой - слой смешения (сдвига) полуограниченной струи со спутным потоком. Вместе с тем известно [4], что внешнее сечение (в данном случае слой сдвига) оказывает воздействие на формирование гидродинамических образований в погранслое на поверхности тела, а, в свою очередь, существуют сведения [4] о высокой чувствительности самих сдвиговых течений даже к малым, приходящим извне возмущениям.

Отсюда с учетом представлений [5] следует предположить, что в тонкослойных течениях со спутным потоком должна существовать специфическая реализация когерентного турбулентного движения газовой среды и соответственно складываться особые структурно - гидродинамические условия теплоотдачи.

Изучение общей картины течения проводилось по методу Теплера [6] на экспериментальной установке, схема опытного участка которой представлена на рисунке 1.

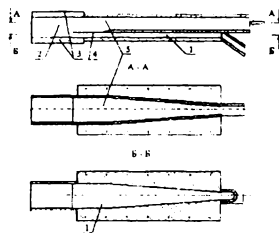


Рис. 1 Схема опытного участка: 1 - канал подачи среды для создания пристенной струи; 2 - зона визуализации; 3 - стенки из оптического кварцевого стекла; 4 - разделительная стенка из фольги; 5 - канал формирования спутного потока

Воздух для создания основного (спутного) потока подавался от нагнетателя 0-325-11 через задвижку, измерительную диафрагму и плоский диффузор с углом раскрытия 6° , а затем проходил прямолинейный участок стабилизации сечением 40×100 мм, зону визуализации и выходил в затопленную среду. Пристенный струйный поток образовывался либо воздухом из пневмомагистрали, либо углекислым газом из баллона. Обе среды последовательно шли через запорный вентиль, редуктор давления, ротаметр и поступали в канал, подобный тракту формирования основного потока с той разницей, что размеры его выходного сечения составляли 5×100 мм. Общая длина опытного участка равнялась 900 мм. Участки стабилизации обоих течений имели общую разделительную стенку из стальной фольги толщиной 0,1 мм с заточкой выходной кромки, что позволяло свести к минимуму влияние кормового следа. Оптическая ось прибора Теплера производства "Карл Цейс (Иена)" была перпендикулярна номинальной плоскости взаимодействия потоков.

На рисунке 2 приведена типичная теплерограмма, полученная при вдуве углекислого газа с температурой t_2 и средней скоростью \bar{u}_2 в неподвижную воздушную среду ($\bar{u}_1 = 0$) с температурой t_1 . Представленная фотография указывает на возникновение в слое смешения когерентных структур, напоминающих вихревые жгуты.



Рис. 2 Теплерограмма изотермического течения при вдуве струи CO_2 в неподвижное воздушное пространство: $\bar{u}_2 = 2$ м/с; $t_1 = t_2 = 16^\circ$. Струя двигалась слева направо

Поскольку теневая фотография дает как бы интегральный "вид свер-

ху"на исследуемое течение, то для выявления поперечного строения потока в зоне существования жгутов была осуществлена визуализация течения методом "многолезвийного светового ножа" в плоскости, перпендикулярной осям предполагаемых образований. Для этого вводился трассер в виде дыма, эжектируемого струей. "Лезвия" формировались матрицей с пятью плоскими щелями, установленной в световом пучке с параллельными лучами. "Световые срезы" свидетельствуют (рис. 3) о том, что в пристенной зоне образуется многослойная структура из линейных цепочек вихрей, закрученных в одну сторону. При этом интенсивность вихреобразования убывает по мере удаления от номинальной плоскости сдвига к стенке, и совсем угасает в вязком подслое.

Визуальные наблюдения теневой картины позволили выделить по ходу потока три характерные области развития вихревых структур. На начальном участке (зона I), когда расстояние вдоль по потоку от кромки разделительной стенки X не превышало четырех высот щели b ($X^* = X/b \leq 4$), оси жгутов были неподвижны. В средней части ($4 < X^* \leq 15$) оси вихревых структур совершали поперечные к направлению движения потока колебания, амплитуда которых росла с увеличением расстояния X . Еще ниже по течению (зона III) жгуты размывались, а на теневой картине наблюдалось движение чередующихся темных и светлых полос, что, по-видимому, указывает на образование крупномасштабных волновых структур. С увеличением скорости вдува \bar{u}_2 пристенной струи в затопленное пространство диаметр вихревых структур, образующихся в зоне I, уменьшается, а их количество, приходящееся на единицу длины нормали к оси X , увеличивается. При инжектировании струи в спутный поток диаметр жгутов уменьшается с возрастанием разности скоростей $\Delta u = \bar{u}_2 - \bar{u}_1$, а место зарождения жгутов сдвигается назад по потоку к кромке разделительной стенки.

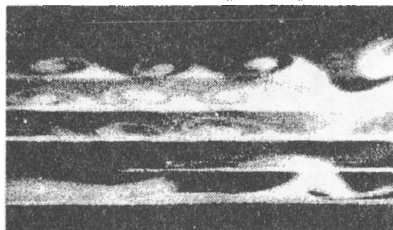


Рис. 3 Поперечный срез структуры пристенной струи, визуализированной методом "светового ножа": - пространство: $\bar{u}_2 = 2\text{м/с}$; $t_1 = t_2 = 16^\circ$

Для окончательного суждения о структуре течения был проведен статистический анализ полей пульсации скорости и температуры среды, измеренных с помощью двухканального термонемометра с постоянной температурой нити диаметром 8 мкм и длиной 3 мм. Опыты проводились на установке с опытным участком той же геометрии (см. рис. 1), но работающей на всасывание и над-

строенной входным конфузуром с профилем Витошинского, что позволяло обеспечить низкий уровень интенсивности ($\epsilon_u \leq 1\%$) начальной турбулентности обоих течений. Кроме того, пристенная струя могла подогреваться электронагревателем до температуры 200°C .

Оказалось, что при уменьшении или увеличении разности скоростей Δu частоты, соответствующие максимуму ϵ_u в зонах I и III пропорционально сдвигаются, сохраняя при этом их отношение примерно равным двум.

При анализе корреляции пульсаций температуры на поверхности подстилающей стенки канала в зоне I были выявлены продольные полосы с высокой степенью статистической связи, расстояние между экстремумами коэффициента корреляции которых приблизительно равнялось шагу между осями вихревых жгутов. Соответственно в зоне III были обнаружены поперечные к оси X полосы с высокой корреляцией, совпадающие по положению с описанными выше областями разной освещенности на теплорограммах.

Данные визуализации и статистического анализа были сопоставлены с распределением локального коэффициента теплоотдачи на стенке, омываемой пристенной струей, которые были определены по методике [7].

Это позволило представить следующую картину развития структур и выявить их роль в теплообмене. Образовавшиеся в зоне I вихри спариваются, возникают результирующие вихревые структуры, оси которых начинают вращаться (эффект прецессии). Чуть ниже по течению формируется двойная гидродинамическая конструкция: крупномасштабная, как бы гофрированная (в пространстве) структура несет на себе упомянутые результирующие вихри. Нечто похожее наблюдается и в свободном сдвиговом слое [4], но там S - образная структура транспортирует парные вихри, закрученные в разные стороны.

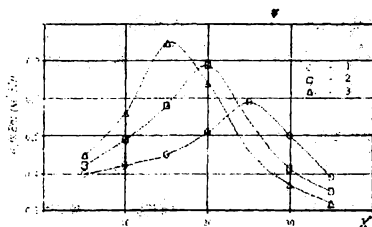


Рис. 4 Распределение локального коэффициента теплоотдачи α_x вдоль оси канала X^* при различной разности скоростей - пространство:

Δu ($\bar{u}_1 = 10\text{ м/с}$) 1 - $\Delta u = 1\text{ м/с}$; 2 - 5; 3 - 10.

Амплитуда колебаний несущей структуры растет, увлекаемые ей вихри достигают вязкого подслоя на поверхности стенки, возмущают его, что и приводит к резкой интенсификации теплоотдачи (рис. 4). При этом взаимодействии

диссипация энергии жгутов будет весьма значительной, поскольку по нашим данным скорость их скольжения по поверхности близка к скорости звука. Ниже по течению волновые поперечные структуры постепенно оттесняются от поверхности нарастающим вязким подслоем, и коэффициент теплоотдачи монотонно убывает.

Полученные представления о когерентных структурах, образующихся в турбулентных тонких пристенных струях, и их роли в теплообмене потока с поверхностью тела могут послужить основой для разработки методов управления теплоотдачей.

Библиографический список

1. К. Кадотани, Р. Ж. Голдстейн, Тр. Америк. о-ва инж.-мех. Энерг. машины и установки, С 3, 169 (1979).
2. V. P. Lebedev, V. V. Lemanov, S. Ya. Misyura ets, Int. J. Heat. Mass. Transf., 38, 2117 (1995).
3. В.Г. Лушик, А.Е. Якубенко, МЖГ 6, 48 (1997).
4. Б. Дж. Кантуэлл, Волны и вихри, М.: Мир, 1984, с. 9.
5. Ю. Т. Климонтович, Турбулентное движение и структура хаоса: Новый подход к статистической теории открытых систем, М.: Наука, 1990.
6. Л. А. Васильев, Теневые методы, М.: Наука, 1968.
7. Р. Р. Дилз, П. С. Фоллансби, Тр. Америк. о-ва инж.-мех. Энерг. машины и установки, 4, 1 (1977).
8. А.М. Полетаев, Л.Т. Плаксина, Б.П. Жилкин. Влияние акустического воздействия на гидродинамику и теплоотдачу в газовых пристенных струях. Сб. науч. тр. Проблемы электроэнергетики, машиностроения и образования/Под ред. Г.К. Смолина. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2005. 267 с.