УДК 533.924+536.24

МОДЕРНИЗАЦИЯ МОДЕЛЕЙ РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ МИШЕНЯМИ

А. И. ВЕРЕМЕЙЧИК
Брестский государственный технический университет
Брест, Беларусь

Исследование процессов тепломассопереноса при ударе высокотемпературных плазменных струй о преграды остается актуальной задачей. Обычно итоги таких фундаментальных изысканий сводятся к полуэмпирическим критериальным уравнениям, которые связывают безразмерные числа Нуссельта или Стэнтона с локальными коэффициентами теплоотдачи. Однако на практике использование классических подходов (например, зависимостей Б. Н. Юдаева [1]) часто выявляет математическую несогласованность расчетных формул на границах автомодельных зон. Это существенно снижает точность прогнозирования кинетики термического удара. Научная новизна данной работы заключается в устранении этих расчетных противоречий за счет прецизионного профилирования локальной тепловой нагрузки и дальнейшей верификации сопряженной модели.

В рамках физической задачи рассмотрено ортогональное соударение осесимметричного турбулентного плазменного потока с плоской поверхностью стальной мишени. Интенсивный нагрев фронтальной плоскости обусловлен сочетанным влиянием конвекции и радиационного излучения газовой фазы. Конвективная составляющая теплового удара формируется путем прямого переноса кинетической и внутренней энергии из пограничного слоя струи. Для детального анализа гидродинамики потока и сопряженных механизмов переноса энергии была разработана обобщенная физико-математическая схема.

Моделируемая область включает внешнюю газовую среду с параметрами высокотемпературного газа на срезе сопла плазмотрона (энтальпия, среднемассовая скорость и температура потока до 6 000 К), а также внутреннюю зону – объем деформируемой стальной пластины. При переходе потока в область гидродинамического торможения и стагнации кинетическая энергия газа трансформируется в тепловую. Из-за градиента статического давления плазменная струя растекается радиально вдоль поверхности раздела фаз. Непосредственно у стенки возникает вязкий и тепловой пограничный слой, лимитирующий интенсивность конвективного теплообмена по закону Ньютона – Рихмана. При этом масштаб зоны термического влияния коррелирует с параметром гауссова распределения тепловой нагрузки.

Для описания интенсивности теплопереноса применен критериальный подход, определяющий безразмерное число Стэнтона через локальные числа Рей-

нольдса (рассчитанные по толщине потери энергии) и числа Прандтля. Интегрирование уравнения энергии пограничного слоя для окрестности критической точки позволило устранить функциональные разрывы, свойственные традиционным зависимостям Б. Н. Юдаева на стыках автомодельных режимов течения. Влияние начальной турбулентности струи авторы аппроксимировали с помощью эмпирического коэффициента, привязанного к пульсационной составляющей скорости.

Модернизированный алгоритм позволил рассчитать локальные коэффициенты теплоотдачи для аргоновой, азотной и кислородной плазмы в диапазонах температур 4 000 и 6 000 К при варьировании объемного расхода. Установлено, что по мере роста режимного числа Рейнольдса локальное число Рейнольдса по толщине потери энергии монотонно увеличивается (с постепенным затуханием темпа роста), тогда как число Стэнтона нелинейно убывает. Это подтверждает закономерное ослабление безразмерной интенсивности теплоотдачи при развитии динамического пограничного слоя и увеличении общей скорости потока. Сравнительный анализ показал, что в исследуемом диапазоне параметров пиковая интенсивность теплоотдачи достигается в азотной плазме при расходе 100 л/мин и температуре факела 6 000 К. Такой эффект вызван эндотермической диссоциацией двухатомных молекул азота и его высокой молекулярной теплоемкостью в данном температурном интервале. Кислородная плазма показала близкие, но чуть меньшие значения. Аргон, в силу низких теплофизических транспортных свойств одноатомного инертного газа, продемонстрировал минимальные коэффициенты теплоотдачи на всех режимах. Увеличение объемного расхода закономерно интенсифицирует теплоотдачу для всех газов под влиянием динамического напора.

В работе количественно зафиксирована топология энергетического баланса на границе раздела сред. Результирующий тепловой поток в критической точке распределяется следующим образом: конвективный перенос обеспечивает основной вклад (около 90 %), а на радиационную долю дугового столба приходится порядка 10 %. В ходе непрерывного термического удара и нагрева лицевой поверхности пластины плотность конвективного потока монотонно падает из-за сокращения температурного градиента между газом и стенкой. При этом лучистый приток энергии остается практически неизменным. Падение конвективного вклада на фоне стабильной радиационной составляющей приводит к перераспределению долей в общем балансе: небольшому снижению конвективной части и повышению радиационной.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Юдаев, Б. Н.** Газодинамическое сопротивление нагреваемых тел / Б. Н. Юдаев. – М. : Машиностроение, 1973. – 264 с.