

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА МИКРОЧАСТИЦЫ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДОЙ

В. И. Бородин, В. А. Трухачева

Петрозаводский государственный университет, borvi@karelia.ru

Газодисперсные смеси широко используются как в обычных термических, так и плазменных технологиях, и расчет процессов теплообмена между частицами вводимого вещества и газовой фазой является необходимым этапом при разработке данных технологий. Однако, в литературе, в основном, обсуждаются вопросы, непосредственно связанные с нагревом частиц в Ньютоновском приближении теплообмена с использованием коэффициента теплоотдачи и не рассматриваются процессы изменения свойств среды (возмущение), окружающей частицу [1]. Однако, в ряде случаев, при рассмотрении тепло-, массо- и зарядообменных явлений в газодисперсной среде такая информация необходима.

В настоящей работе приводятся результаты расчетов изменения температурного поля вокруг частиц разного диаметра, помещенных в высокотемпературную среду аргона. При расчетах не учитывается движение частиц относительно плазмы. Данная ситуация имеет место в системах без потоков, а также в струях газа с мелкими частицами (диаметрами порядка или меньше 10 мкм для атмосферного давления), когда они за счет аэродинамической силы разгоняются практически до скорости струи.

При расчетах учитывались только кондуктивные тепловые потоки на частицу, что соответствует реальным тепловым потокам для среды с не слишком высокой температурой (например, для аргона порядка 7000 К), которые часто реализуются в плазмохимических процессах при косвенном нагреве от внешних генераторов плазмы. Не учитывались также заряженные частицы, роль которых в теплообмене при данных условиях мала [1]. Для выделения влияния чисто кондуктивного механизма теплообмена при расчетах частица считалась неискряющейся.

Расчеты проводились с использованием двух моделей для теплообмена: модель сплошной среды (континуальная модель) и непрерывно-дискретная модель, суть которой следующая.

Выделим вокруг частицы концентрическую сферу радиусом $r_\ell = r_0 + \ell$, расположенную на расстоянии средней длины свободного пробега ℓ от поверхности частицы (рис. 1). На поверхность частицы попадают молекулы, испытавшие последнее столкновение с

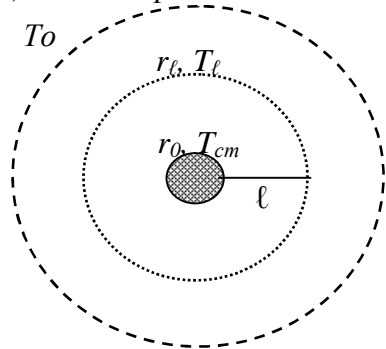


Рис. 1

другими молекулами в слое ℓ . В качестве модели теплообмена частицы с окружающим газом при числе Кнудсена $Kn = \ell/d \geq 1$ (ℓ - длина свободного пробега молекул, d - диаметр частицы) была выбрана следующая непрерывно-дискретная модель (рис. 1): от бесконечности до радиуса r_ℓ (с температурой T_ℓ) использовалась модель сплошной среды, а в слое ℓ использовалась дискретная модель, где поток I молекул на частицу определялся формулой: $I = 4p \cdot r_0^2 \frac{n\bar{u}}{4}$ (n ,

\bar{u} - концентрация и средняя тепловая скорость молекул газа соответственно). При столкновении с поверхностью частицы молекулы газа отдают ей часть кинетической энергии равную $\chi \frac{3}{2} k(T_1 - T_{cm})$, где χ - коэффициент аккомодации. Отвод энергии от частиц считался чисто радиационным.

Используя вышеуказанные модели, были рассчитаны температурные поля и другие теплообменные характеристики системы аргон – частица.

Типичный пример результатов расчетов температурных полей газа, окружающего частицы, при атмосферном давлении приведен на рис. 2.

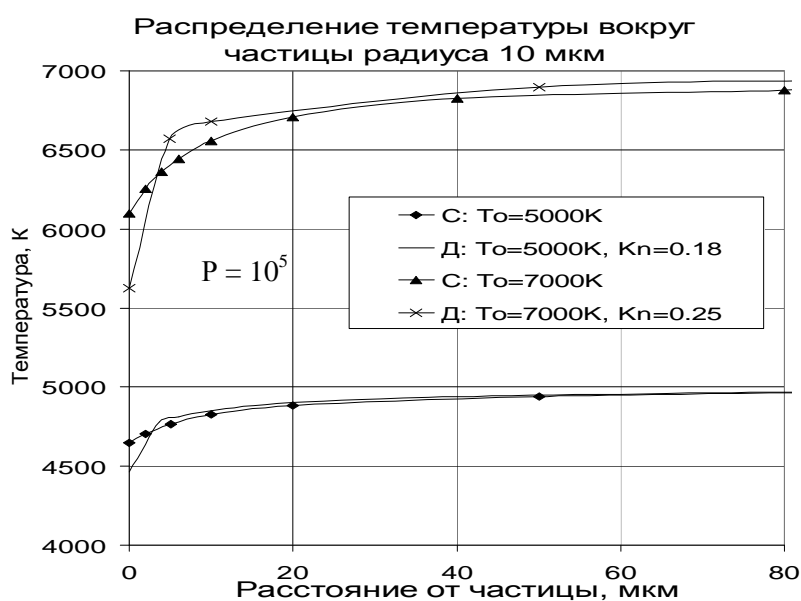


Рис. 2

лообмена применять нельзя.

Результаты, полученные по непрерывно-дискретной модели, показывают, что мелкие частицы, для которых $Kn \geq 1$, не могут быть нагреты (причем существенно) до температуры близкой к температуре окружающего газа, как это следует из континуальной теории теплопроводности. Связано это с тем, что, как показывают расчеты, реальные тепловые потоки на частицу, обусловленные потоком молекул газа, значительно меньше соответствующих потоков континуальной модели теплообмена.

С уменьшением давления газа критерий Kn увеличивается при прочих равных условиях, область применения модели сплошной среды сужается, но зато увеличивается верхний размер частиц, не возмущающих температурное поле окружающего газа. Так если при $P = 1$ атм, таковой размер был порядка 1 мкм, то при давлении $P = 0.1$ атм он увеличился практически до 10 мкм, то есть примерно прямо пропорционально значению Kn .

Уменьшение давления газа приводит к существенному уменьшению тепловых потоков на частицу и к степени ее нагрева. Для мелких частиц, когда они практически не возмущают температурное поле газа, разность (скачек) температур между стенкой и газом сосредоточена в пристеночном слое толщиной, равной средней длине свободного пробега молекул газа, где нет равновесия и где неправомерно вводить такую характеристику как температура газа.

Исследования, описанные в данной работе, были проведены в рамках проекта PZ-013-02, поддерживаемого совместно Американским фондом гражданских исследований и развития (АФГИР), Министерством образования РФ и правительством Республики Карелия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нанесение покрытий плазмой / В.В. Кудинов, П.Ю. Пекшев, В.Е. Белашенко и др. М.: Наука, 1990. 408 с.

Результаты показывают, что вплоть до частиц размером 10 мкм имеет место большое возмущение исходного однородного температурного поля, причем это возмущение распространяется на расстояния, значительно превышающие размеры частиц. Данное возмущение практически исчезает при размерах частиц порядка и меньше 1 мкм.

Результаты расчетов по разным моделям хорошо совпадают при значениях $Kn \ll 1$, и расходятся при значениях $Kn \geq 1$, когда условие сплошности среды не выполняется и континуальную теорию теплообмена применять нельзя.