

ТЕПЛОВАЯ ЗАЩИТА СТЕНОК ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

С.М. Аринкин, ст. науч. сотр., канд. техн. наук,

Институт тепло- и массообмена НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

Общая постановка проблемы и ее связь с научно-практическими задачами. В настоящее время тепловая защита стенок энергетических установок, у которых температура активного объема достигает десятков тысяч градусов, остается актуальной задачей [1 - 3]. К таким установкам относятся плазменные реакторы, газофазные ядерные двигатели, камеры сгорания авиационных и ракетных двигателей. Особенно перспективно использование стенок таких установок из пористых тугоплавких материалов с транспирационным охлаждением.

Обзор публикаций и анализ нерешенных проблем. В работе [4] предложено в энергоустановках с водородным рабочим телом использовать легкокипящие соединения тугоплавких металлов, которые при температуре 15 – 350°C переходят из твердого в газообразное состояние. Проходя через горячую пористую стенку они ее охлаждают, а на выходе при температуре 1200–1700°C восстанавливаются. В пристеночном слое создается газопылевая завеса из частиц металла. Она поглощает и рассеивает тепловое излучение в широком диапазоне длин волн. В работе [5] установлено, что такая среда при движении по каналу плазмотрона интенсивно укрупняется. Происходит непрерывное изменение поглощающих и рассеивающих свойств. В работе [5] получено, что в диапазоне длин волн теплового излучения $0,005 < \lambda < 1$ мкм наибольшую величину массового коэффициента ослабления излучения обеспечивают частицы с радиусами $0,03 \leq r \leq 0,1$ мкм. С уменьшением размера частиц максимум ослабления излучения сдвигается в область ультрафиолета, для которого наибольшее экранирование обеспечивает газопылевая среда с размерами частиц $0,005 \leq r \leq 0,03$ мкм. При температурах в объеме установки в диапазоне $10000 \leq T \leq 100000^\circ\text{K}$ максимальная мощность излучения приходится на об-

ласть длин волн $0,005 < \lambda < 0,04$ мкм. Это диапазон рентгеновского излучения и вакуумного ультрафиолета. Следуя работе [5], для тепловой защиты стенок в этой области температур необходимо создать газопылевую завесу с размерами частиц порядка нескольких десятков ангстрем. С другой стороны, известно, что металлические частицы таких размеров почти не поглощают излучение, а только рассеивают его [6]. Во всех приведенных работах не рассматривается влияние газопылевой завесы на газодинамические характеристики плазмы активного объема установки. Отмеченное укрупнение частиц, т.е. изменение размера частиц в зависимости от времени нахождения в плазме, приводит к неравномерной по стенке тепловой защите.

Цель исследований. Для выяснения указанных выше вопросов целесообразно провести численный эксперимент по определению характеристик плазмы активного объема высокоэнергетической установки с учетом транспирационного охлаждения и взаимодействия излучения с металлическими частицами.

Постановка задачи. Рассматривая в качестве высокоэнергетической установки плазмотрон линейной схемы с пористыми стенками, были проведены численные расчеты характеристик электродуговой водородной плазмы по методике, описанной в работе [8]. Образование газопылевой завесы происходит при вдуве через пористые стенки канала соединений WCl_6 , WF_6 , SiCl_4 и восстановлении их при взаимодействии с водородной плазмой. Учет кинетики образования вольфрама в этих условиях весьма сложен. Поэтому решение поставленной задачи проводится в упрощенном виде. Наличие вольфрамовых частиц моделировалось специальным распределением плотности и теплофизических свойств по радиусу канала. Для учета переноса излучения использовался метод парциальных характеристик [9]. Поток излучения из

водородной плазмы в газопылевом слое отражается и частично поглощается частицами вольфрама. Соотношение между отраженным и поглощенным потоками зависит от размера частиц. Расчеты проведены при атмосферном давлении для двух радиусов канала 0,5 и 1 см. Диапазон изменения токов варьировался от 100 до 300 А. Рассматривались расходы водорода 0,1 и 1 г/с. Учитывая, что в реакции восстановления на долю вольфрама приходится 94% веса WCl_6 [10], в упрощенном варианте расход W принимался равным 2,35 г/с. Граничное условие для уравнения переноса энтальпии выбиралось из соображения постоянства температуры стенки канала.

Результаты исследования. Для моделирования электродуговой плазмы использовались дифференциальные уравнения переноса в приближении пограничного слоя в цилиндрической системе координат [8], которые решались методом потоковой прогонки. Для учета рассеяния теплового потока частицами вольфрама были использованы таблицы и методика [6]. На рисунке 1 показано уменьшение теплового потока в стенку канала плазмотрона при наличии газопылевой завесы с частицами W размером 1 и 0,1 мкм.

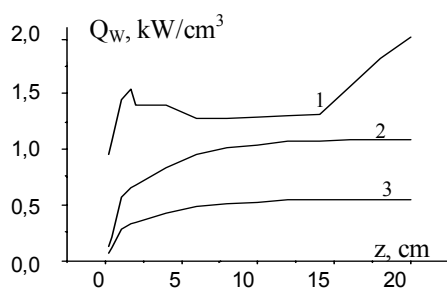


Рис. 1. $I=200A$, $G=0,1g/s$, $R=0,5cm$.

- 1. - без завесы,
- 2. - $r_W = 1\mu m$,
- 3. - $r_W = 0,1\mu m$.

Температура на оси канала в первом варианте счета с учетом реабсорбции излучения не превышала 16000К.

Выводы. Решение задачи в упрощенном варианте (без рассмотрения кинетики образования частиц вольфрама) показало эффективность газопылевой

защиты стенок. Наличие металлических частиц в 2-3 раза снижает тепловые потоки в стенку канала.

Литература

1. Аринкин С.М. Способ защиты и диагностики стенки камеры сгорания // ИФЖ.- 2001.- Т. 74, № 6.- С. 1203.
2. Хеберлайн В., Пфендер Е. Пористое охлаждение стенок камеры сгорания // Теплопередача.- 1971.- № 2.- С. 368.
3. Том Г.К., Швенк Ф.К. Системы на основе газопылевого ядерного топлива // Ракетная техника и космонавтика.- 1978.- Т. 16, № 1.- С. 124.
4. А.с. 130724 (СССР). Способ защиты стенки высокоэнергетической установки / С.М. Аринкин, М.С. Третьяк, 1992.
5. Аринкин С.М. Ослабление лучистой энергии газопылевыми потоками // Теплообмен-78: Сб. науч. тр.- Минск: ИТМО, 1978.- С. 123.
6. Хьюст Г. Рассеяние света малыми частицами. - М.: Наука, 1961.- 278 с.
7. Исследование коэффициентов ослабления излучения и индикатрис рассеяния газопылевыми средами: Отчет № 1298.- Минск: ИТМО, Нью-Йоркский университет, 1976.
8. Панасенко Л.Н. Влияние реабсорбции излучения на характеристики и термическое состояние электродуговой плазмы // 4 Междунар. симп. по радиации и плазмодинамике.- М., 1997.- С. 174.
9. Степанов К.Л., Панасенко Л.Н. Интегральный перенос излучения реального спектра в задачах радиационной плазмодинамики // ИФЖ.- 1999.- Т. 72, № 6.- С. 1103-1112.
10. Сурис А.Л. Плазмохимические процессы и аппараты.- М.: Химия, 1989.- С. 277.

Поступила в редакцию 12.06.03

Рецензенты: д-р техн. наук, проф., чл.-корр. НАН Беларуси Н.Н. Дорожкин, НАН Беларуси, г. Минск; канд. техн. наук А.В. Лоян, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.