

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ СУБЛИМАЦИИ ВЕЩЕСТВ

В. К. САФОНОВ

В процессе сублимации для перевода веществ из твердого состояния в парообразное в последнее время применяют лучистый подвод энергии, подвод энергии радиоволнами, воздействие ультразвуком и т. п. В этом случае интенсивность скорости испарения во много раз превосходит скорости испарения при подводе энергии кондуктивным или конвективным методом. Но независимо от вида используемой энергии процессы конвективного переноса в области среднего вакуума играют существенную роль.

Как показывают эксперименты [1], при плотности лучистой энергии $q_u = 698 \div 1070 \text{ вт/м}^2$ и при постоянном давлении в сублиматоре $P_c = 66,6 \text{ н/м}^2$ доля конвективной составляющей от q_u колеблется, соответственно, в пределах $0 \div 6,5\%$. Конвективной составляющей в этом случае можно пренебречь.

Совершенно другая картина наблюдается при $P_c > 66,6 \text{ н/м}^2$. Согласно исследованиям Е. А. Ермаковой [2] при малой плотности лучистой энергии (температура стенок сублиматора $t_{cm} = 24^\circ\text{C}$ и $P_c = 133,3 \text{ н/м}^2$) доля конвективной составляющей от q_u равна $(31 \div 40)\%$. На основании этого можно считать, что в условиях вязкостного и молекулярно-вязкостного режима интенсивность процесса тепло- и массообмена не может быть обеспечена только молекулярным механизмом переноса.

Для аналитического учета конвективной составляющей необходимо детальное изучение гидродинамических условий, возникающих при испарении из твердого состояния. Наиболее важным в этом случае может быть изучение скоростного поля около образца. Однако измерение скорости в интересующих нас условиях связано с большими трудностями.

Характерным является также распределение полей давления, плотности и температур в вакууме. В настоящее время имеются удовлетворительные данные по распределению плотности в пограничном слое сублимирующего тела [3] и распределению температур в объеме сублиматора [2]; [4], но пока не существует надежных методов определения полей давлений. Предварительное рассмотрение явления не приводит к подробной его модели и, значит, мы не можем вывести основных уравнений. Если же вывести уравнения не удастся, исследование придется строить на основе соотношений, гораздо менее конкретных. Установим связь между коэффициентом теплообмена, гидродинамикой массообмена

и термодинамическими свойствами парогазовой среды, исходя из следующих предположений.

В пограничном слое сублимирующего тела инерционными силами нельзя пренебрегать. По мере удаления от поверхности сублимации эти силы настолько быстро уменьшаются, что на расстоянии 0,015 м практически равны нулю. В таком случае станет возможным построить комплекс Пекле, который быстро вырождается по мере удаления от поверхности сублимирующего тела. В комплекс Пекле (Pe) входит скорость потока, но при сублимации невозможно задать какую-либо скорость циркуляции парогазовой среды у поверхности образца. По физической обстановке [5], складывающейся в пограничном слое, парогазовая смесь многократно циркулирует. Существуют нисходящие и восходящие потоки, и скорее всего это напоминает свободное движение газа у нагретой горизонтальной поверхности. В этом случае для исключения скорости воспользуемся еще одним комплексом π_{GF} , который представляет собой меру отношения силы тяжести к силе внутреннего трения. Тогда произведение $Pe \cdot \pi_{GF} = Gr \cdot Pr$, как видим, дает нам произведение двух новых комплексов, из которых один есть критерий Грасгофа, а другой — Прандтля. Данные критерии содержат такие величины, которые определены по условию.

Рассмотрим теперь, какие комплексы характеризуют термодинамические свойства парогазовой среды в пограничном слое. При сублимации вещества со свободной поверхности в пограничный слой парогазовой смеси попадают мельчайшие частицы вещества. В этом случае в данном слое появляется сток тепла, обусловленный испарением частиц. Это выражение для стока можно учесть комплексом Гухмана (Gu). Критерий Гухмана является величиной переменной, поскольку температура парогазовой смеси изменяется поперек и вдоль пограничного слоя. Однако при постоянной интенсивности сублимации для заданного температурного интервала можно внести усредненный критерий Gu . Таким образом, мы определили наиболее существенные комплексы, влияющие на конвективный теплообмен при условии, что основное количество энергии поступает радиацией. Так как искомой величиной является коэффициент теплообмена, то зависимость между критериями подобия должна быть представлена в виде

$$Nu = f(Gr, Pr, Gu),$$

где Nu — число Нуссельта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. П. Лебедев. Кинетика процесса сублимации льда под вакуумом при радиационном подводе тепла. В сб.: «Тепло- и массоперенос», том 10, Минск, изд. «Наука и техника», стр. 204, 1968.
2. Е. А. Ермакова. Исследование распределений температуры при испарении из твердого состояния под вакуумом. ИФЖ, том 7, № 5, стр. 39, Минск, 1964.
3. В. А. Соловьев. Исследование плотности парогазовой среды в пограничном слое сублимирующего тела. ИФЖ, том 15, № 5, стр. 804, Минск, 1968.
4. А. В. Лыков. Тепло- и массообмен в процессах сушки. Госэнергоиздат, 1956.
5. А. А. Гухман. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло- и массообмена. М., «Высшая школа», стр. 283, 1967.