

**УЧЕТ ПРОИЗВОДСТВА NO ПРИ ПРЯМОМ СТАТИСТИЧЕСКОМ
МОДЕЛИРОВАНИИ ГЕТЕРОГЕННЫХ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ
НА ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ СПУСКАЕМОГО АППАРАТА**

А.С. Литвинцев, Е.А. Бондарь

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук
630090, г. Новосибирск, Россия*

Поверхностные реакции играют существенную роль в переносе тепла на поверхность спускаемого аппарата, входящего в атмосферу. Поскольку эти реакции являются экзотермическими, отсутствие их учета модели в расчет может привести к существенно занижению значения теплового потока на поверхность спускаемого аппарата. Таким образом, правильно разработанная каталитическая модель позволяет повысить точность расчета теплового потока, что имеет не только фундаментальное, но и прикладное значение. Например, точное предсказание теплового потока на поверхность позволяет уменьшить вес тепловой защиты и увеличить полезную нагрузку аппарата.

При моделировании аэротермодинамики спускаемых аппаратов на больших высотах (более 80 км) нельзя опираться на сплошноредные модели из-за существенной неравновесности течения. Основным инструментом численного расчета таких течений является метод прямого статистического моделирования (ПСМ). Для моделирования поверхностных процессов в рамках метода ПСМ требуется информация о вероятностях и временах процессов для конкретных молекул. В [1] был предложен подход для получения такой микроскопической информации на основе детальных макроскопических кинетических механизмов поверхностных процессов. Одним из ограничений предложенного подхода является отсутствие учета реакций рекомбинации, приводящих к образованию монооксида азота. Как отмечается в [2,3] такие реакции могут играть существенную роль в кинетике поверхностных процессов. В настоящей работе проведено обобщение подхода [1] на кинетику поверхностных процессов, включающих образование монооксида азота.

Предложенная модель была основана на кинетическом механизме Куротаки для теплозащитного покрытия на основе SiO₂ [4]. Модель была реализована в программном комплексе SMILE++. В доработанном коде добавлена возможность участия одного типа вещества сразу в нескольких реакциях рекомбинации с различными реагентами, как для реакции рекомбинации Или-Ридела, так и для реакции рекомбинации Лэнгмюра-Хиншельвуда. Верификация модифицированного программного комплекса проводилась путем сравнения равновесной заселенности поверхности атомами N и O с учетом различных реакций в зависимости от температуры с рассчитанными аналитически равновесными значениями. На Рисунке 1 видно отличное согласие результатов расчетов с теорией, что демонстрирует способность предложенной модели предсказывать макроскопические скорости реакций в условиях термического равновесия.

В докладе и статье будет представлен детальный анализ влияния производства NO на поверхности тепловой защиты на высотную аэротермодинамику спускаемого аппарата.

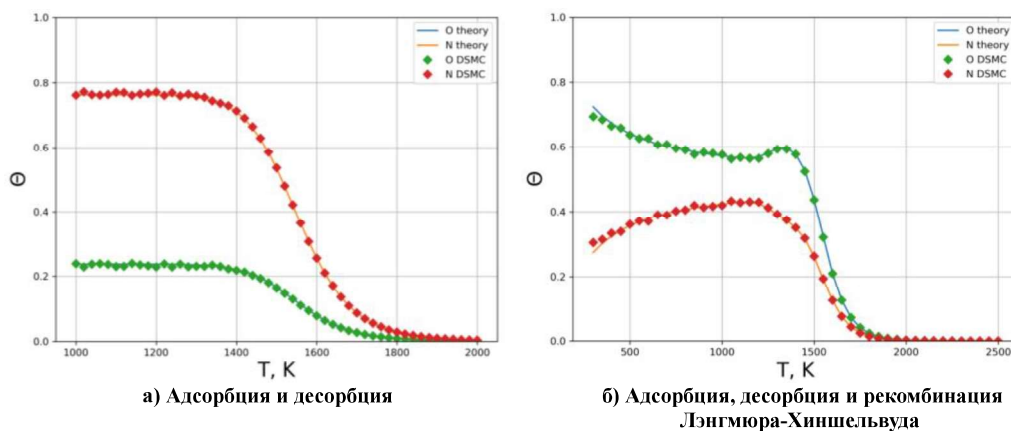


Рис. 1. График равновесной заселенности поверхности атомами O и N (по оси у отмечена поверхностная доля адсорбированных частиц относительно полного числа мест на поверхности).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Molchanova A.N., Kashkovsky A.V., Bondar Ye.A.** Surface recombination in the direct simulation Monte Carlo method // *Phys. Fluids*, 30 (2018), Article 107105.
2. **Dusan A. Pejakovic, Jochen Marschall, Lian Duan, and Maria P. Martin.** "Direct Detection of NO Produced by High-Temperature Surface-Catalyzed Atom Recombination" // *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 24, No. 3 (2010), pp. 603-611. <https://doi.org/10.2514/1.47175>
3. **Joshua M. Weisberger, Matthew G. MacLean, Ronald A. Parker, and Paul DesJardin.** "Near-Surface Nitric Oxide Concentration Measurement in the LENS-XX Expansion Tunnel Facility" // 44th AIAA Thermophysics Conference, AIAA 2013-2643.
4. **Kurotaki, T.,** Catalytic Model on SiO₂-Based Surface and Application to Real Trajectory // *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 38, No. 5, 2001, pp. 798-800.