

09.1

## Исследование спектра излучения молекулы CaO в диапазоне длин волн 540–650 nm в экспериментах на ударной трубе

© Н.О. Безверхний, Т.А. Лапушкина, Н.А. Монахов, М.В. Петренко, С.А. Поняев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: nikolaybezverhny@gmail.com

Поступило в Редакцию 20 июля 2020 г.

В окончательной редакции 30 сентября 2020 г.

Принято к публикации 2 октября 2020 г.

Исследован спектр излучения молекулы CaO за фронтом отраженной ударной волны на ударной трубе диаметром 50 mm. Спектры получены с помощью специально разработанного компактного спектрометра с CCD-линейкой, а также с помощью спектрометра на базе модернизированного монохроматора МДР-12 и фотоаппарата Sony SLT-A77 в качестве приемника излучения. Получены спектры излучения CaO при разных газовых температурах. Представленные результаты могут быть использованы для проверки теоретических моделей спектра излучения молекулы CaO при различных температурах.

**Ключевые слова:** ударная труба, отраженная ударная волна, оксид кальция.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.02.50540.18473

Проблема движения тел в атмосфере Земли и планет Солнечной системы представляет значительный интерес как в случае летательных аппаратов, так и в случае космических тел, например метеоров. При входе в плотные слои атмосферы тело тормозится, в результате чего его поверхность испытывает нагрев, который приводит к интенсивной абляции. При движении в атмосфере крупных тел, таких как спускаемый аппарат и болид, с большой скоростью перенос тепла к обтекаемому телу потоками лучистой энергии доминирует над другими факторами нагрева его поверхности [1].

В работе [2] анализируется молекулярное излучение в спектре яркого болида абсолютной звездной величины  $-19.5$ . В спектрах были идентифицированы молекулярные полосы, принадлежащие оксидам FeO, CaO, AlO и MgO. Проведено сравнение данных с теоретическими расчетами присутствия молекул в смеси метеорных паров и воздуха на различных высотах и при различных температурах. Однако FeO и CaO не были подробно проанализированы из-за того, что их молекулярные константы недостаточно определены. Молекулярные полосы AlO и CaO обнаруживаются методами лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии горных пород и отложений [3]. В то время как экспериментальному изучению спектра излучения молекулы AlO посвящено большое число работ, например [4,5], изучению спектра излучения молекулы CaO в оптическом диапазоне уделяется мало внимания. Двухатомная молекула CaO представляет интерес для астрофизических исследований [6,7]. Также предполагается, что CaO, который диссоциирует на Ca и O, является источником Ca в атмосфере Меркурия [8]. Спектр молекулы CaO в видимом диапазоне длин волн наблюдался в экспериментах по взаимодействию быстролетающих медных снарядов с поликристаллическими доломитовыми мишенями [9]. По-

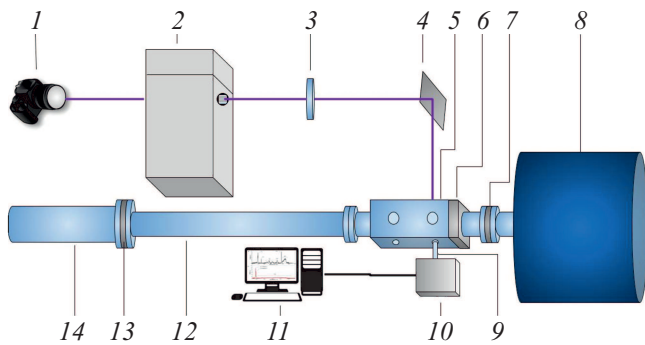
пытки моделирования спектра излучения молекулы CaO проводились в работе [10]. Авторы провели моделирование спектра излучения CaO в области 590–630 nm, которое сравнивалось с экспериментально наблюдаемыми спектрами болида. Было достигнуто умеренное согласие модели с экспериментальными спектрами. Наибольшая неопределенность при моделировании была связана с наличием в спектре полос FeO, которые перекрываются с полосами CaO в области 590–630 nm.

В настоящей работе продемонстрирована возможность исследования спектра молекулы CaO в оптическом диапазоне длин волн в газодинамическом эксперименте на ударной трубе. В спектрах не наблюдается полос FeO, что дает возможность независимо исследовать спектр излучения CaO в области 590–630 nm.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. В ее основе лежит ударная труба, состоящая из камеры высокого давления (КВД) 14 и камеры низкого давления (КНД) 12. Ударная труба непосредственно соединена с измерительной секцией 5 с торцом из сплава алюминия 6, а затем через диафрагменный блок 7 с демпферным баком 8.

КВД 14 представляет собой канал круглого сечения длиной 100 см и диаметром 5 см для напуска толкающего газа. Перед экспериментом КВД откачивается безмасляным форвакуумным насосом до давления 10 Pa, затем заполняется толкающим газом до половины рабочего давления.

КНД 12 — это труба круглого сечения длиной 432.5 см и диаметром 5 см, которая заполняется рабочим газом. Камера откачивается форвакуумным насосом. Контроль вакуума и рабочего давления производится с помощью датчика Пирани InstruTech CVG101GC. Камера откачивается до вакуума 0.1 Pa, затем заполняется



**Рис. 1.** Схема установки. 1 — фотоаппарат Sony SLT-A77, 2 — МДР-12, 3 — линза, 4 — зеркало, 5 — измерительная секция, 6 — торец, 7, 13 — диафрагменные блоки, 8 — демпферный бак, 9 — коллиматор, 10 — компактный спектрограф, 11 — ПК, 12 — камера низкого давления, 14 — камера высокого давления.

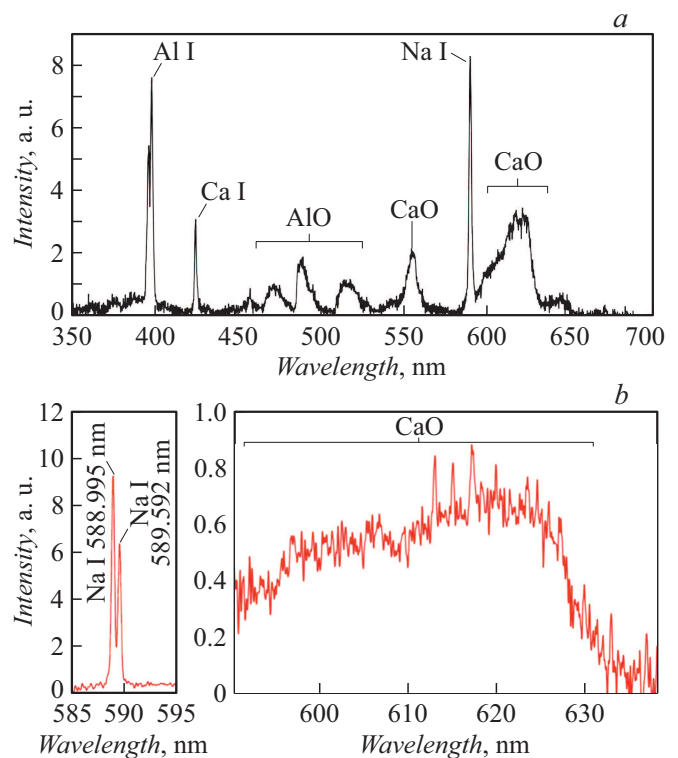
рабочим газом; диапазон рабочих давлений от 130 до  $10^5$  Pa.

КНД от КВД отделяется алюминиевой диафрагмой, расположенной в диафрагменном блоке 13 между камерами. Перед диафрагмой установлен крестообразный нож, который способствует разрыву диафрагмы. После разрыва диафрагмы в ударной трубе формируется падающая ударная волна. При отражении падающей ударной волны от торца 6 происходит нагрев газа за счет перехода кинетической энергии газового потока во внутреннюю энергию.

Для измерения скорости ударной волны в измерительной секции 5 на расстоянии 52 mm друг от друга размещены пьезоэлектрические датчики давления. Сигнал с датчиков давления поступает на четырехканальный цифровой осциллограф (TDS-2024C), подключенный к компьютеру. Длительность временной развертки осциллографа в данных экспериментах составляла 100  $\mu$ s, шаг временного интервала — 0.04  $\mu$ s. Погрешность измерения скорости ударной волны не превышает 5%. Измерительная секция оборудована кварцевыми окнами, через которые осуществляются спектральные измерения. Интенсивности атомных линий и молекулярных полос регистрировались с помощью компактного спектрографа 10 со спектральным разрешением  $\sim 0.7$  nm, а также монохроматора МДР-12 (2 на рис. 1), модернизированного для работы в качестве спектрографа. Для этого с МДР-12 была снята выходная щель. Фотоаппарат Sony SLT-A77 (1 на рис. 1) с макрообъективом Sony 100 mm f/2.8 Macro фокусировался на плоскость выходной щели. Спектральное разрешение такой системы составляет  $\sim 0.3$  nm. В экспериментах измеряются интегральные по времени спектры излучения газа. Калибровка по длинам волн проводилась с помощью ртутной лампы, калибровка спектральной чувствительности — с помощью калиброванной лампы накаливания ТРШ 2850-3000.

В настоящей работе в качестве рабочего газа использовался воздух, в качестве толкающего газа — водород. На рис. 2, *a* и *b* представлены полученные в результате обработки спектры при давлении воздуха в КНД  $P_1 = 0.93 \pm 0.09$  kPa, давление водорода в КВД, при котором произошел разрыв диафрагмы,  $P_4 = 4.25 \pm 0.01$  MPa. Скорость ударной волны, измеренная по сигналам датчиков давлений в измерительной секции, составила  $V = 2.9 \pm 0.2$  km/s, что соответствует числу Маха  $M = 8.7 \pm 0.3$ .

Идентификация наблюдаемых в спектрах атомарных линий осуществлялась с помощью базы данных спектральных линий NIST Atomic Spectra Database. Линии принадлежат металлам Al, Ca, Na. Также в спектре наблюдаются молекулярные полосы AlO ( $B^2\Sigma^+ - X^2\Sigma^+$ ), которые были идентифицированы по работам [4,5], и полосы излучения молекул CaO переходов ( $d^3\Delta_2 - a^3\Pi_1$ ), ( $e^3\Sigma - a^3\Pi_1$ ), ( $c^3\Sigma^+ - a^3\Pi_1$ ), ( $C^1\Sigma^+ - a^3\Pi_1$ ), ( $D^1\Delta - a^1\Pi_1$ ), ( $c^3\Sigma_1 - a^3\Pi_0$ ), ( $c^3\Sigma^+ - a^3\Pi_2$ ) и др. [9]. Наблюдаемые в спектре атомарные линии и молекулярные полосы являются следствием взрывного испарения вещества с поверхности торца при торможении ударной волны. Торцевая измерительная секция изготовлен из сплава алюминия (марки АМг), что объясняет наличие в спектре линий излучения атомов Al, Ca и Na, а также полос AlO и CaO. Молекулы CaO и AlO также могут образовывать



**Рис. 2.** Спектры излучения отраженного от торца газа. *a* — спектр, полученный на компактном спектрометре; *b* — спектр, полученный при помощи спектрометра на базе монохроматора МДР-12.

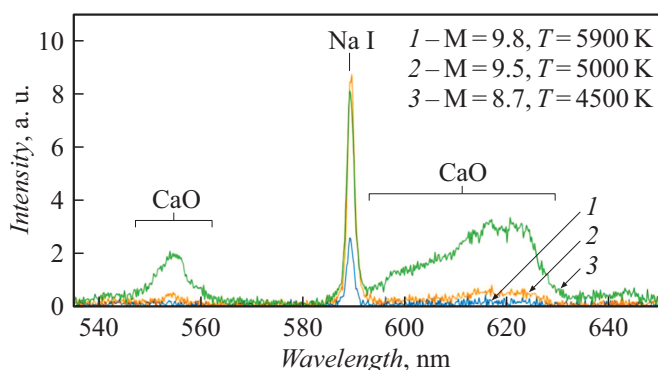


Рис. 3. Спектры излучения отраженного от торца газа для различных значений числа Маха.

Результат обработки экспериментальных данных

$P_1$ , kPa	$P_4$ , MPa	M	$T$ , K
$0.40 \pm 0.04$	$4.4 \pm 0.1$	$9.8 \pm 0.5$	$5900 \pm 600$
$0.53 \pm 0.05$	$4.4 \pm 0.1$	$9.5 \pm 0.5$	$5000 \pm 250$
$0.93 \pm 0.09$	$4.3 \pm 0.1$	$8.7 \pm 0.4$	$4500 \pm 130$

ся в результате реакций между атомами на поверхности торца и кислородом, содержащимся в воздухе.

Для определения температуры проводилось сравнение экспериментальных данных с моделью спектра излучения AlO ( $B^2\Sigma^+ - X^2\Sigma^+$ ), построенной на основании работы [11]. Моделирование проводилось в предположении, что излучающая плазма находится в тепловом равновесии. Наилучшее соответствие между экспериментальными данными для числа Маха  $M = 8.7$  и моделью наблюдается при температуре  $T = 4500$  K.

В таблице приведены значения температуры газа для различных режимов, определенные по молекулярным полосам AlO, значения чисел Маха и начального давления газа. Данные получены путем обработки соответствующих спектров излучения, приведенных на рис. 3. Из рисунка видно, что тенденция изменения интенсивности излучения полос CaO отличается от поведения интенсивности атомарных линий, в частности, атома Na. Это отличие можно объяснить разной скоростью возбуждения соответствующих энергетических уровней у атомов и молекул вследствие различия механизмов энергетического обмена, а также нагрева молекулярных и атомарных газов [12]. Быстрая ответная реакция спектра полос молекулы CaO на изменение температуры газа позволяет использовать его для определения температуры газа, в том числе для быстротекающих газодинамических процессов. Для уточнения методики требуются теоретические расчеты спектра излучения CaO в присутствии молекул AlO и атомов Na, Ca и Al.

Таким образом, в работе получены спектры излучения молекулы CaO за фронтом отраженной ударной волны в экспериментах на ударной трубе. Проведена оценка

температуры по наблюдаемым в спектре молекулярным полосам AlO. Продемонстрирована возможность исследования спектра молекулы CaO в оптическом диапазоне в газодинамическом эксперименте на ударной трубе. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для проверки теоретических моделей спектра излучения молекулы CaO при различных температурах.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] С.Т. Суржилов, *Радиационная газовая динамика спускаемых космических аппаратов. Многотемпературные модели* (Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, М., 2013).
- [2] J. Borovička, A.A. Berezhnoy, *Icarus*, **278**, 248 (2016).
- [3] N. Killiny, E. Etxeberria, A.P. Flores, P.G. Blanco, T.F. Reyes, L.P. Cabrera, *Sci. Rep.*, **9**, 2449 (2019).
- [4] J. Hermann, A. Lorusso, A. Perrone, F. Strafella, C. Dutouquet, B. Torralba, *Phys. Rev. E*, **92**, 053103 (2015).
- [5] J.M. Peucker, P. Lynch, H. Krier, N. Glumac, *Propellants Explos. Pyrotech.*, **38**, 577 (2013).
- [6] S. Sakamoto, G.J. White, K. Kawaguchi, M. Ohishi, K.S. Usuda, T. Hasegawa, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **301**, 872 (1998).
- [7] E.W. Guenther, J. Cabrera, A. Erikson, M. Fridlund, H. Lammer, A. Mura, H. Rauer, J. Schneider, M. Tulej, Ph. von Paris, P. Wurz, *Astron. Astrophys.*, **525**, A24 (2011).
- [8] R.M. Killen, *Icarus*, **268**, 32 (2016).
- [9] S. Sugita, P.H. Schultz, S. Hasegawa, *JGR: Planets*, **108**, 5140 (2003).
- [10] A.A. Berezhnoy, J. Borovička, J. Santos, J.F. Rivas-Silva, L. Sandoval, A.V. Stolyarov, A. Palma, *Planet. Space Sci.*, **151**, 27 (2018).
- [11] А.В. Ефимов, *Развитие методов комплексного спектрального анализа многокомпонентной движущейся плазмы импульсных разрядов*, канд. дис. (Объединенный институт высоких температур РАН, М., 2017).
- [12] D. Staack, B. Farouk, A. Gutsol, A. Fridman, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **17**, 025013 (2008).