

УДК 536.71

УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ РЕГОЛИТА И ХОНДРИТА
ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ© 2024 г. Член-корреспондент РАН И. В. Ломоносов^{1,*}

Поступило 14.12.2023 г.

После доработки 14.12.2023 г.

Принято к публикации 25.12.2023 г.

С использованием принципа аддитивности при ударном сжатии построены широкодиапазонные уравнения состояния реголита и обыкновенного хондрита для области высоких давлений.

Ключевые слова: уравнение состояния, высокие давления, реголит, хондрит

DOI: 10.31857/S2686740024020023, EDN: KIBPDE

Фундаментальные вопросы образования, структуры, динамики и эволюции объектов Солнечной системы [1, 2] требуют знания уравнения состояния (УРС) вещества при высоких давлениях [3]. УРС также необходимо для проведения численного моделирования различных высокоэнергетических процессов в космосе. К их числу следует отнести процессы ударного воздействия различного масштаба, как, например, прохождения космического аппарата через кометное облако в проекте “Венера–Галлей” [4], столкновения металлического ударника с ядром кометы Tempel 1 [5], эксперимент LCROSS по поиску водяного льда на южном полюсе Луны [6], проблемы столкновения кометы Шумейкера–Леви с Юпитером [7, 8], а также задачи астероидной опасности и защиты от космического мусора. Данные обстоятельства мотивируют разработку УРС таких веществ, как реголит, составляющий материал поверхности Луны [9, 10], и обыкновенный хондрит, основной материал метеоритов [11].

Современное состояние проблемы УРС вещества, методы экспериментальных исследований и теоретические подходы изложены в монографиях [3, 12] и публикациях [13].

В практике построения УРС вещества для широкой области фазовой диаграммы максимально используются результаты теоретических расчетов и имеющийся массив разнородных экспериментальных данных [3, 13].

Согласно данным исследований, поверхность Луны представляет собой структуру сложного физико-химического состава [9, 10]. Доставленные лунными экспедициями образцы реголита имеют среднюю плотность 1.2 г/см³, пористость до 50% и состоят из частиц спекшейся и разрушенной породы. Отдельные фрагменты грунта, камни имеют плотность от 1.3 до 1.8 г/см³ и близкий химический состав, который в среднем можно оценить как SiO₂ – 40–45%, FeO – 20%, Al₂O₃ – 12%, CaO – 10% (массовые проценты). Свойства реального лунного грунта исследованы методом ударного сжатия в работе [14], где получены аппроксимационные соотношения $D = a + bU$ (D – скорость фронта ударной волны, U – массовая скорость вещества за фронтом) для ударных адиабат фаз низкого и высокого давлений, соответственно: $\rho_{00} = 1.8$ г/см³, $a = 0.1$ км/с, $b = 1.3$ при $0.68 < U < 1.02$ км/с и $a = -1.01$ км/с, $b = 2.39$ при $0.99 < U < 1.83$ км/с. Рисунок 1 иллюстрирует ударные адиабаты фаз низкого и высокого давления реголита [14] в кинематических переменных волновая – массовая скорость ударной волны. Рассмотрение зависимостей [14] давления от плотности показывает аномальность сжатия – при увеличении давления плотность уменьшается. Данная

¹Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, Черноголовка, Московская обл., Россия
*E-mail: ivl143@fcp.ac.ru

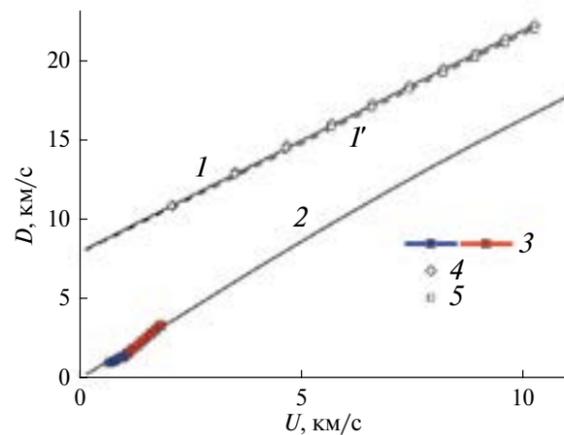


Рис. 1. Ударные адиабаты реголита и хондрита. Обозначения: линии 1 и 1' – расчет по УРС фаз высокого давления реголита и хондрита, 2 – реголит начальной плотности $\rho_{00} = 1.8 \text{ г/см}^3$; точки 3 – данные измерений [14], 4 и 5 – расчет смесевых ударных адиабат реголита и хондрита соответственно по правилу аддитивности.

особенность типична для случая ударного сжатия пористого вещества [2]. Использование аппроксимаций [14] в УРС лунного грунта допустимо при проведении численного моделирования высокоскоростного удара по реголиту указанной начальной плотности при давлениях до 10 ГПа.

В более общем случае необходимо использовать реалистичное УРС. Сложность задачи заключается в отсутствии экспериментальных данных о свойствах реголита при высоких давлениях более 100 ГПа и практической невозможности описания материала столь сложных структуры и состава с применением современных первопринципных методов. В подобной ситуации целесообразно основываться на имеющейся при высоких давлениях информации о свойствах основных оксидов, образующих реголит.

Знание ударных адиабат компонент реголита позволяет рассчитать его смесевую ударную адиабату. Согласно принципу аддитивности, в случае ударного сжатия для давления P_H на ударной адиабате удельный объем вещества, состоящего из N компонент, представляется выражением:

$$V = \sum_{i=1}^N x_i V_i,$$

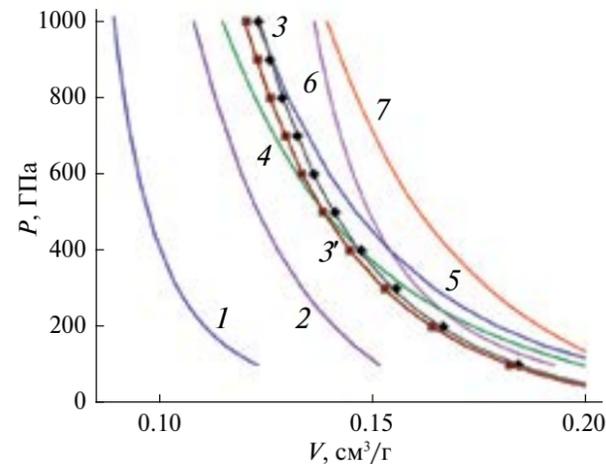


Рис. 2. Ударные адиабаты реголита, хондрита и порообразующих оксидов. Обозначения: сплошные линии – расчет по УРС [17, 18], 1 – вюстит FeO, 2 – рутил TiO_2 , 3 и 3' – реголит и хондрит (точки – смесевая ударная адиабата), 4 – корунд Al_2O_3 , 5 – периклаз MgO , 6 – известь CaO , 7 – стишовит SiO_2 .

где x_i и V_i – массовая доля и удельный объем каждой компоненты [15, 16]. Применимость принципа аддитивности показана для смесей парафин-мрамор [15], парафин-вольфрам [16] и, впоследствии, сплавов и композитных материалов. В области высоких давлений для TiO_2 , Al_2O_3 , MgO и SiO_2 разработаны широкодиапазонные калорические УРС [17], в случае FeO – многофазное УРС [18] и аналогичное для CaO. Расчет смесевой ударной адиабаты реголита состава TiO_2 (10%), Al_2O_3 (11%), FeO (17%), MgO (9%), CaO (11%) и SiO_2 (42%) (взяты массовые проценты компонентов, их состав соответствует морскому реголиту [9]), показан на рис. 2 при давлениях от 100 до 1000 ГПа.

Процедура определения параметров фазы высокого давления вещества приведена в работе [19], и, следуя данной методике, определена начальная плотность фазы высокого давления реголита $\rho_0 = 4.13 \text{ г/см}^3$, модуль изоэнтропического сжатия и его производная по давлению, используемые далее при построении УРС по модели [17]. Рассчитанные по УРС ударные адиабаты реголита показаны на рис. 1, 2 в сопоставлении с соответствующими смесевыми ударными адиабатами. Из анализа рисунков следует высокая точность описания смесевой ударной адиабаты при высоких давлениях и непротиворечивое описание результатов измерений ударной сжимаемости пористого материала

реголита с начальной плотностью $\rho_{00} = 1.8 \text{ г/см}^3$ [14] при давлениях до 10 ГПа.

Хондриты – метеориты, содержащие хондры, сферические или эллиптические образования. В классификации метеоритов хондриты составляют наиболее распространенную подгруппу. Хондриты показывают более 92% от количества падений на Землю каменных метеоритов и более 85% от общего количества метеоритов. Обыкновенные хондриты встречаются наиболее часто. Согласно [11], группы H, L и LL близко связаны и образуют клан обычных хондритов. Результаты исследований собранных образцов Челябинского метеорита показали [20], что по содержанию главных элементов в темной и светлой фракциях он относится к LL-типу обыкновенных хондритов. Типичный состав LL-типа хондритов (массовые %): SiO_2 (40.6), TiO_2 (0.13), Al_2O_3 (2.36), Cr_2O_3 (0.54), FeO (26.62), MnO (0.35), MgO (25.22), CaO (1.92), Na_2O (0.95), K_2O (0.1), P_2O_5 (0.22) (сумма 98.89%) также приведен в работе [20].

Вклад в ударную сжимаемость смеси компонент при массовом содержании вещества менее 1% пренебрежимо мал, поэтому для расчета примем указанный состав LL-хондрита с учетом данного фактора и правильной нормировки: SiO_2 (42%), Al_2O_3 (3%), FeO (28%), MgO (25%), CaO (2%) (сумма 100%). Результаты для фазы высокого давления хондрита, хотя более корректно полагать, что это фаза высокого давления вещества метеорита, соответствующего по составу LL-хондриту, также показаны на рис. 2. Обращает внимание близость положения в p - V -плоскости смесевых ударных адиабат обоих материалов, реголита и хондрита, несмотря на различия в их составе. Причина, по-видимому, в том, что основной вклад в ударную сжимаемость вносит плотная модификация кварца, стишовит, чья массовая доля наибольшая, а вклад вюstitа и периклаза, хотя и отличается по массовой доле почти в 2 раза для реголита и хондрита, не является столь определяющим. Построенное УРС хондрита с высокой точностью описывает смесевую ударную адиабату. Сопоставление также приведено на рис. 1 и в кинематических переменных отличие УРС реголита и хондрита выражено еще слабее, чем на рис. 2.

Таким образом, в данной работе предложен и реализован метод построения УРС реголита и хондрита с использованием расчетных смесевых ударных адиабат для области высоких давлений, полученных на основе принципа аддитивности и знания ударных адиабат основных образующих оксидов. Разработанные широкодиапазонные УРС реголита и хондрита могут эффективно применяться при проведении численного моделирования высокоэнергетических процессов.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 21-72-20023).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронаев С.А., Кривенко А.П. Оценка температурных напряжений в литосфере ранней Луны // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2023. Т. 508. № 1. С. 53–58. <https://doi.org/10.31857/S2686740022060153>
2. Воронаев С.А., Душенко Н.В., Федулов В.С., Сенин В.Г. Особенности дегазации хондрита ДНАЖАЛА (НЗ.8) // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2023. Т. 509. № 1. С. 76–80. <https://doi.org/10.31857/S2686740023020104>
3. Фортв В.Е. Уравнения состояния вещества: от идеального газа до кварк-глюонной плазмы. М.: Физматлит, 2012. 492 с.
4. Анисимов С.И., Бушман А.В., Канель Г.И. и др. Физика разрушения при высокоскоростном ударе // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. 1984. Т. 39. № 1. С. 9–12.
5. Клумов Б.А., Ким В.В., Ломоносов И.В. и др. Возможные наблюдательные эффекты в эксперименте Deep Impact // Успехи физ. наук. 2005. Т. 175. № 7. С. 767–777. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0175.200507f.0767>
6. Schultz P.H., Hermalyn B., Colaprete A. et al. The LCROSS cratering experiment // Science. 2010. V. 330. N 6003. P. 468–472. <https://doi.org/10.1126/science.1187454>
7. Клумов Б.А., Кондауров В.И., Конюхов А.В., Медведев Ю.Д., Сокольский А.Г., Утюжников С.В., Фортв В.Е. Столкновение кометы Шумейкер–Леви 9 с Юпитером: что мы увидим? // Успехи физ. наук. 1994. Т. 164. № 6. С. 617–629. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0164.199406c.0617>
8. Фортв В.Е., Гнедин Ю.Н., Иванов М.Ф., Ивлев А.В., Клумов Б.А. Столкновение кометы Шумейкер–Леви 9 с Юпитером: что мы увидели // Успехи физических наук. 1996. Т. 166. № 4. С. 391–422.

- <https://doi.org/10.3367/UFNr.0166.199604c.0391>
9. Physics and astronomy of the Moon. Ed. Z. Kopal. N.Y.: Acad. Press, 1971. 328 p.
 10. Лунный грунт из Моря Изобилия. Под ред. А.П. Виноградова. М.: Наука, 1974. 624 с.
 11. *Wasson J.T., Kallemeyn G.W.* Compositions of chondrites // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences.* 1988. V. 325. N. 1587. P. 535–544. <https://doi.org/10.1098/rsta.1988.0066>
 12. *Фортв В.Е.* Мощные ударные волны на Земле и в космосе. М.: Физматлит, 2018. 416 с.
 13. *Ломоносов И.В., Фортва С.В.* Широкодиапазонные полуэмпирические уравнения состояния вещества для численного моделирования высокоэнергетических процессов // *Теплофизика высоких температур.* 2017. Т. 55. № 4. С. 596–626. <https://doi.org/10.1134/S0018151X17040113>
 14. *Ahrens T.J., Cole M.* Shock compression and adiabatic release of lunar fines from Apollo 17. In: *Proc. 5th Lunar Science Conf., Suppl. 5. Geochim. Et Cosmochim. Acta.* 1974. V. 3. P. 2333.
 15. *Дремин А.Н., Карпунин И.А.* Метод определения ударных адиабат дисперсных веществ // *ПМТФ.* 1960. № 3. С. 184–188.
 16. *Алексеев Ю.Ф., Альтшулер Л.В., Крупникова В.П.* Ударное сжатие двухкомпонентных парафино-вольфрамовых смесей // *ПМТФ.* 1971. № 4. С. 152–155.
 17. Ломоносов И.В. Уравнения состояния сапфира, кремнезема, периклаза и рутила // *ТВТ.* 2023. Т. 61. № 3. С. 473–476. <https://doi.org/10.31857/S004036442303016X>
 18. *Николаев Д.Н., Ломоносов И.В.* Уравнение состояния оксида железа при давлении ≤ 1 ТПа // *ТВТ.* 2023. Т. 61. № 2. С. 318–320. <https://doi.org/10.31857/S004036442302014X>
 19. *McQueen R.G., Marsh S.P., Fritz J.N.* Hugoniot equation of state of twelve rocks // *J. Geophysical Research.* 1967. V. 72. N. 20. P. 4999–5036. <https://doi.org/10.1029/JZ072i020p04999>
 20. *Галимов Э.М., Колотов В.П., Назаров М.А. и др.* Результаты вещественного анализа метеорита Челябинск // *Геохимия.* 2013. № 7. С. 580–580. <https://doi.org/10.7868/S0016752513070108>

EQUATIONS OF STATE FOR REGOLITH AND CHONDRITE AT HIGH PRESSURE

Corresponding Member of the RAS I. V. Lomonosov^a

^a*Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry,
Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Moscow Region, Russia*

Using the principle of additivity under shock compression, wide-range equations of state of regolith and ordinary chondrite for the high-pressure region are constructed.

Keywords: equation of state, high pressure, regolith, chondrite