

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ВЗВЕСЕЙ ТЯЖЕЛЫХ ЧАСТИЦ ЗА ФРОНТОМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Д. В. Воронин, В. Ф. Анисичкин

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

Проведено численное моделирование двумерного невязкого нестационарного течения за ударной волной, проходящей через взвесь твердых частиц диоксида или карбида урана в жидком железе. Такого рода слои могут возникать внутри планет вблизи твердого планетного ядра. Ударные волны, проходящие в недрах планеты (вследствие возможного столкновения планеты с астероидом), могут изменить параметры слоя. Результаты расчетов показали, что локальная массовая концентрация частиц за падающей и отраженной ударными волнами значительно растет, что может привести к переходу слоя в сверхкритическое состояние и ядерному взрыву внутри планеты. Возможные столкновения частиц, их деформация и дробление учитывались при решении задачи, так же как и изменение полей основных термодинамических параметров внутри каждой частицы и вне ее.

При рассмотрении детонации смесей разнородных частиц, взвесей и ударно-волновых процессов компактирования многокомпонентных смесей, расположенных у жесткой стенки, необходимо знать поведение взвесей тяжелых частиц за фронтом ударной волны (УВ). В настоящей работе исследуется прохождение ударно-волнового возмущения через слой частиц оксида урана, взвешенных в железоникелевом расплаве. Подобного рода слой может возникать в недрах планеты в окрестности ее твердого ядра. УВ, возникшая, например, при столкновении планеты с астероидом, может изменить относительную концентрацию активных частиц. Если локальная концентрация превысит критическое значение, может произойти взрыв внутри планеты в результате цепной ядерной реакции [1]. Возможность уплотнения частиц анализируется в настоящем исследовании.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим смесь жидкого железа (начальная плотность $12,14 \text{ г/см}^3$) и твердых кристаллов диоксида урана (начальная плотность $20,05 \text{ г/см}^3$) в ядре планеты. Частицы диоксида урана расположены хаотично, но первоначально не соприкасаются друг с другом

Работа выполнена в рамках Интеграционного проекта № 24 «Изучение возможности взрывного энерговыделения в недрах планет» при финансовой поддержке Президиума СО РАН.

(рис. 1, а). Тем самым возмущения от одной частицы к другой на начальных стадиях развития процесса могут передаваться только через жидкое железо (несущая фаза). В дальнейшем ситуация может измениться. Начальный диаметр частиц равен 10 см. Слой ограничен справа жестким непроницаемым поршнем (твердое планетное ядро). Считаем, что среда первоначально находится в термодинамическом равновесии. В момент времени $t = 0$ поршень начинает двигаться влево с постоянной скоростью U_0 и инициирует перед собой УВ. Этот случай соответствует выходу УВ из твердого ядра планеты во внешнее жидкое ядро, где расположена указанная двухфазная смесь.

Исследование проводилось в рамках гидродинамического приближения. Уравнения, описывающие двумерное нестационарное движение невязкой сжимаемой сплошной среды при $t > 0$, основаны на законах сохранения массы и импульса и в безразмерных переменных имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{d\rho}{dt} + \rho \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} + S \frac{v}{r} \right) &= 0, \\ \rho \frac{du}{dt} + \frac{\partial p}{\partial z} &= 0, \\ \rho \frac{dv}{dt} + \frac{\partial p}{\partial r} &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь u , v — соответственно продольная и поперечная составляющие скорости среды; p ,

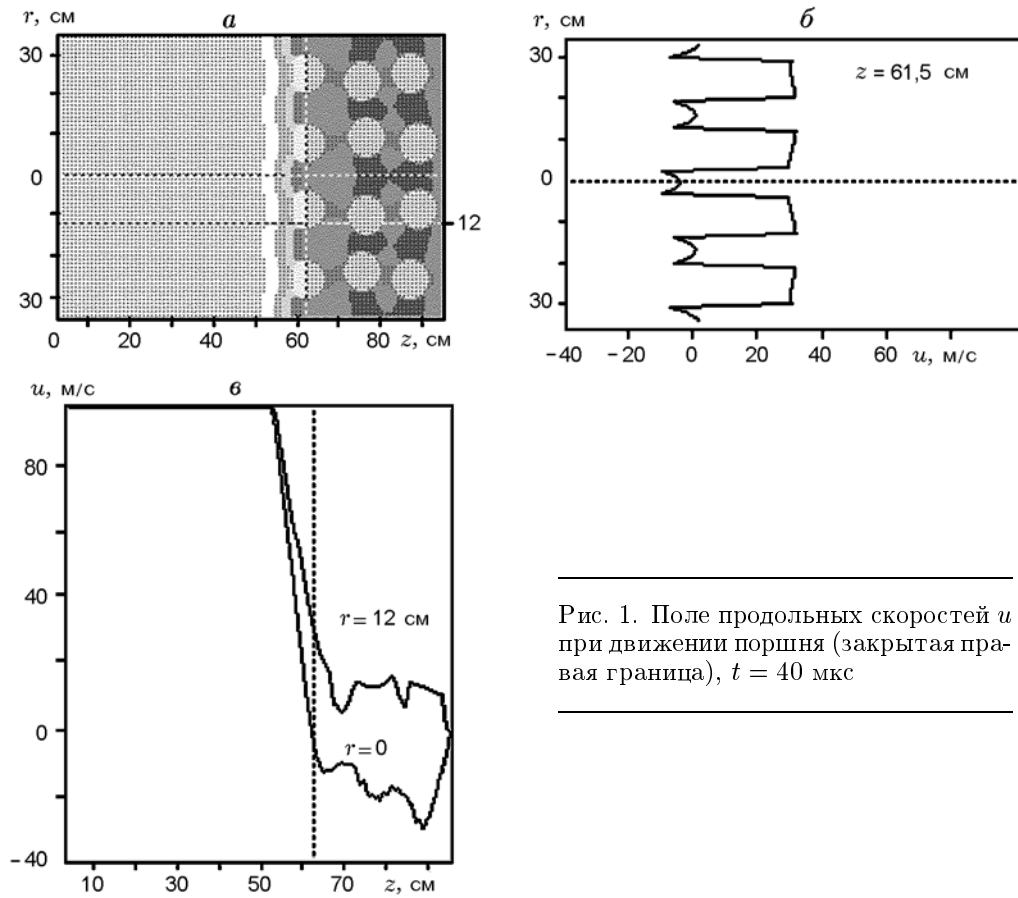


Рис. 1. Поле продольных скоростей u при движении поршня (закрытая правая граница), $t = 40$ мкс

ρ — давление и плотность; z , r — продольная и поперечная пространственные координаты; $S = 0$ — для плоской симметрии, $S = 1$ — для осевой симметрии.

Для замыкания системы (1) использовались соотношения, задающие ударные адиабаты веществ:

$$D = C + LU, \quad \rho(D - U) = \rho_0 D, \quad (2)$$

$$p = \rho_0 D U + p_0,$$

$$E = \frac{p + p_0}{2} \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right) + E_0,$$

где D — скорость УВ, U — массовая скорость за фронтом УВ, L и C — постоянные для данного вещества, E — внутренняя энергия вещества. Здесь и в дальнейшем индекс «ноль» относится к начальному состоянию перед УВ.

Полагаем, что границы между частицами диоксида урана и жидким железом представляют собой контактные разрывы. На каждом из

этих разрывов поставлены следующие граничные условия:

$$U_{n,1} = U_{n,2}, \quad p_1 = p_2.$$

Здесь p_1 , p_2 — значения давления, а $U_{n,1}$, $U_{n,2}$ — значения нормальной к поверхности разрыва составляющей вектора скорости среды $U = (u, v)$, взятые по разные стороны от контактной поверхности. Правую границу области (поршень) считаем закрытой, здесь поставлено условие непротекания (скорость среды равна скорости поршня); верхняя и нижняя границы также закрыты ($v = 0$); левая граница открытая, граничные условия на ней соответствуют условиям на свободной границе.

МЕТОД РАСЧЕТА

Система уравнений (1), (2) с данными граничными условиями решалась методом Харлоу частиц в ячейках, усовершенствованным в работе [2]. Размеры расчетной области: 950 мм

по оси z и 350 мм по оси r . Нижняя граница расчетной области — ось симметрии. Число частиц в ячейках — переменная величина. Численный алгоритм предусматривает возможность объединения и дробления индивидуальных частиц, определяемых методом Харлоу, в зависимости от текущих параметров среды. Максимальное число частиц в ячейке равно семи. Размер расчетной ячейки 0,4 мм.

Отметим, что задача о прохождении УВ через двухфазные слои, расположенные у жесткой стенки, решалась ранее в одномерной постановке в работах [3, 4], причем исследование велось в рамках механики взаимопроникающих континуумов, когда в каждой точке области присутствуют одновременно две фазы, имеющие свои значения термодинамических параметров. Такой подход налагает определенные ограничения на параметры смеси и характер межфазного взаимодействия. Например, размер частиц конденсированной фазы должен быть существенно меньше расчетной ячейки, а взаимодействие частиц может осуществляться только через несущую фазу.

В настоящей работе задача решена в двумерной постановке. В каждой точке присутствует только одна фаза. Не только в несущей фазе (жидкое железо), но и внутри каждой частицы диоксида урана рассчитываются поля скоростей, плотности и давления. С течением времени индивидуальная частица диоксида урана может деформироваться, дробиться, сталкиваться или слипаться с другими частицами. Ограничений на размер частицы нет.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Вычисления велись при следующих значениях констант: для железа $C = 10,26$ км/с, $L = 1,55$; для диоксида урана $C = 8,06$ км/с, $L = 1,39$; $p_0 = 330$ ГПа согласно данным, приведенным в [5, 6]; $U_0 = -0,1$ км/с; начальная объемная концентрация частиц диоксида урана $\beta_0 = 0,35$.

На рис. 1,а представлено поле продольных скоростей u в момент времени $t = 40$ мкс. Здесь и в дальнейшем значения скорости u приведены относительно поршня. Светлые области на рисунке соответствуют большим значениям скорости u . Видно, что влево пошла УВ, интенсивность которой ≈ 13 ГПа на выходе из слоя частиц диоксида урана, взвешенных в жидком железе. На рис. 1,б представлены продольные

профили скорости u по центру канала и в сечении, соответствующем значению $r = 12$ см. На рис. 1,б показан поперечный профиль u вблизи фронта УВ, $z = 61,5$ см (он соответствует штриховой линии на рис. 1,а). За счет дисперсии скорости звука в веществе фронт УВ на выходе из слоя неплоский. Поскольку скорость звука в несущей фазе выше, чем в частицах диоксида урана, и соответственно выше скорость УВ в железе, УВ к этому промежутку времени еще не вышла из частиц в невозмущенную менее плотную среду, что видно из рис. 1. За фронтом расположена зона релаксации скоростей и давлений частиц среды. В ней происходит фильтрация железа: оно выдавливается частицами диоксида из слоя. Скорость частиц диоксида урана в указанном сечении $\approx 11,6$ м/с, а скорость железа в просветах между частицами составляет ≈ -38 м/с. В других поперечных сечениях, расположенных ближе к поршню, ситуация аналогичная. Скорость диоксида урана примерно такая же, скорость несущей фазы приближается к нулю. Таким образом, в зоне релаксации происходит интенсивный процесс уплотнения частиц диоксида урана.

На рис. 2 приведена картина течения в момент времени $t = 1800$ мкс. Видно, что частицы диоксида урана деформируются и оседают на поршне. В некоторых расчетах (при варьировании интенсивности падающей УВ) возможно дробление частиц. При переходе УВ из менее плотной несущей фазы в частицу диоксида урана граница раздела фаз теряет свою устойчивость. Возникают поверхностные волны, амплитуда которых может быть сравнима с размерами частиц. Это видно на рис. 2. Иногда этот процесс приводит к развалу частицы. Таким образом, дробление частиц в данном случае осуществляется по механизму неустойчивости границы. Отметим, что в этом процессе определяющим может оказаться любой тип неустойчивости: Рэлея — Тейлора или Кельвина — Гельмгольца. Используемый алгоритм позволяет рассчитывать оба типа неустойчивости. При малых расстояниях между частицами диоксида урана возможно и их слипание.

Концентрация частиц диоксида урана β в момент времени, соответствующий рис. 2, достигла 0,39. Тем не менее процесс уплотнения продолжается (об этом свидетельствуют профили скоростей на рис. 2,б,в). Несущая фаза имеет существенную отрицательную скорость в сечении $r = 0$ (см. рис. 2,в), что соответству-

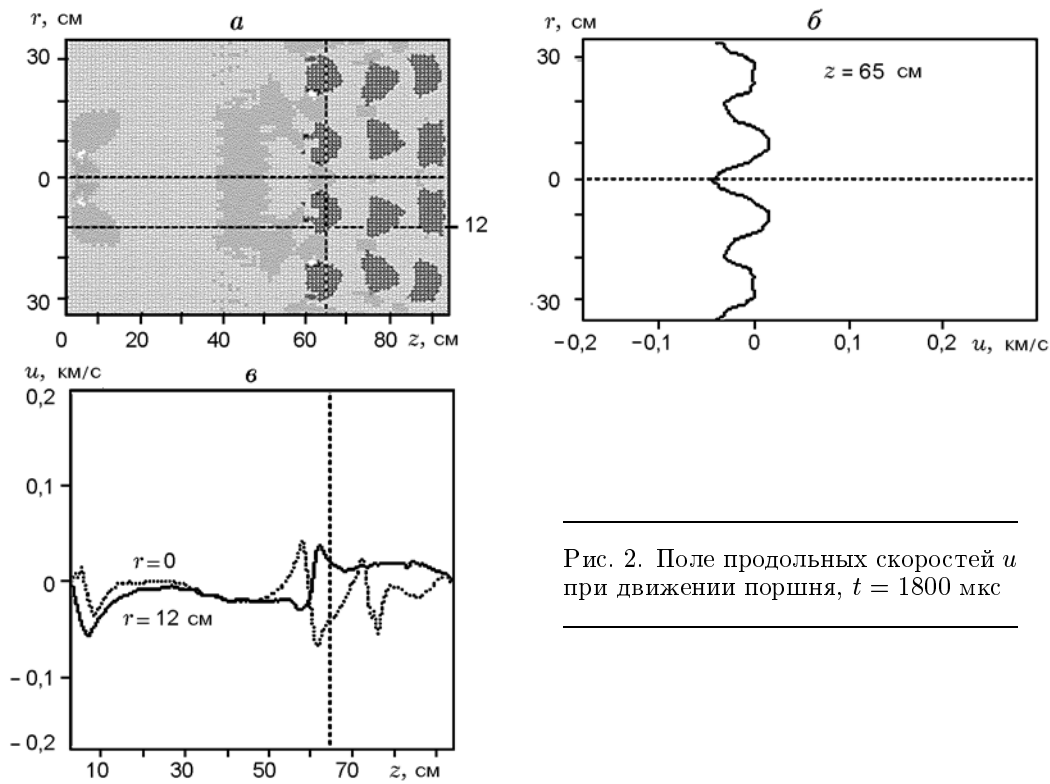


Рис. 2. Поле продольных скоростей u при движении поршня, $t = 1800$ мкс

ет движению в просвете между частицами урана. В сечении $r = 12$ см продольные скорости фаз мало отличаются друг от друга. Здесь железо обтекает частицы диоксида урана преимущественно в поперечном направлении. Оказалось, что возможность уплотнения не зависит от расположения частиц, их объемной концентрации или размера, вида симметрии, скорости поршня, дробления или слипания частиц. Это подтвердилось в расчетах при варьировании соответствующих параметров.

ОТРАЖЕНИЕ УВ ОТ ЖЕСТКОЙ СТЕНКИ

В работе также решена задача для случая, когда УВ движется слева, проходит через слой жидкого железа с частицами диоксида урана, отражается от жесткой стенки (закрытая правая граница) и вторично проходит через слой. Этот случай соответствует прохождению УВ сначала через внешнее ядро планеты (где расположен исследуемый слой), а затем ее входу в твердое планетное ядро и отражению от него. Основные параметры компонентов смеси те же, что и в предыдущем случае, $\beta_0 = 0,23$. Падающая УВ имеет интенсивность $\Delta p \approx 10$ ГПа, отраженная — $\Delta p \approx 23$ ГПа. Результаты расчетов для момента времени $t = 40$ мкс (от времени прохождения центра расчетного поля) при-

ведены на рис. 3. За падающей волной среда начинает двигаться вправо: частицы диоксида урана — со скоростью $u \approx 63,6$ м/с, слой железа — с $u \approx 102$ м/с (сечение $z = 64,5$ см, кривая 2 на рис. 3,б). Значения скоростей приведены в лабораторной системе координат. Видно, что железо втекает в слой, частицы диоксида урана при этом по-прежнему менее подвижны. То есть массовая концентрация частиц в слое в этот промежуток времени падает. Однако этот процесс непродолжителен, он длится лишь до прохождения отраженной от жесткой стенки волны через слой. Причем у жесткой стенки разность скоростей фаз не столь существенная (сечение $z = 86$ см, кривая 1 на рис. 3,б).

За отраженной УВ скорость несущей фазы практически нулевая. Частицы диоксида урана продолжают двигаться вправо со скоростью $u \leq 10$ м/с, начинается уплотнение слоя частиц. Время разуплотнения частиц (падения массовой концентрации) определяется временем между прохождением падающей и отраженной УВ через фиксированную точку пространства. Оно значительно меньше времени скоростной релаксации среды. Поэтому здесь в конечном счете также идет процесс уплотнения.

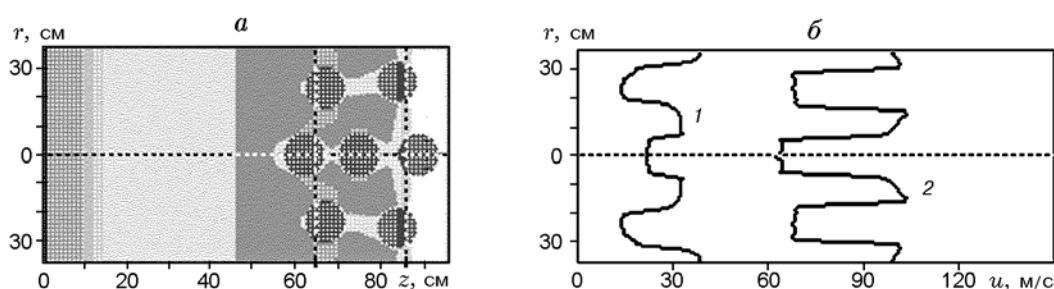


Рис. 3. Поле продольных скоростей u при отражении УВ от жесткой стенки, $t = 40$ мкс: $z = 86$ (1), $64,5$ см (2)

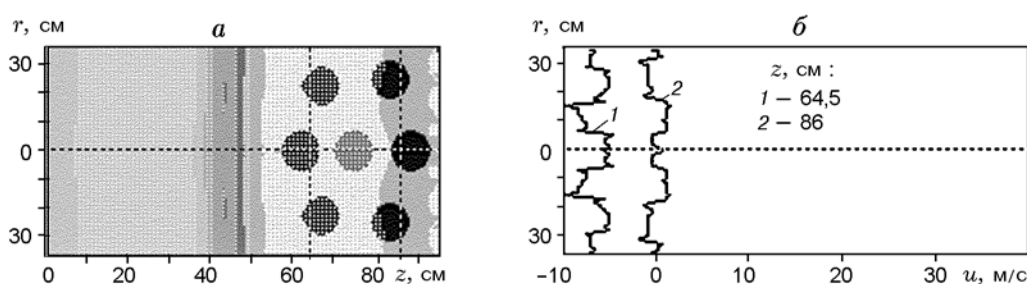


Рис. 4. Поле продольных скоростей u при отражении УВ от жесткой стенки, $t = 100$ мкс

В дальнейшем частицы диоксида урана начинают сближаться и выдавливать железо из слоя. Частицы, расположенные непосредственно у жесткой стенки, сначала тормозятся, а затем приобретают небольшую отрицательную скорость. Крайний левый слой частиц при этом продолжает двигаться вправо. Тем самым слои движутся навстречу друг другу. Затем крайний левый слой тоже приобретает отрицательную скорость, но выдавливание железа продолжается. Это хорошо видно на рис. 4, где приведены профили продольной скорости в момент времени $t = 100$ мкс ($\beta = 0,24$). Профили скорости на рис. 4, б соответствуют поперечным сечениям $z = 64,5$ и $z = 86$ см. Уплотнение слоя становится здесь более интенсивным, чем при прохождении инициированной поршнем УВ через двухфазный слой. При больших значениях t принципиальных изменений в характере процесса не происходит. Существенно меняющих ситуацию волн давления нет, в среде имеет место скоростная релаксация, и скорости несущей фазы и частиц асимптотически стремятся к нулю.

Сравнение рис. 2 и 4 показывает, что в первом случае частицы диоксида урана оседают непосредственно на поршне, во втором — максимальное уплотнение происходит на неко-

тором расстоянии от жесткой стенки. Это означает, что если УВ выходит из плотной среды (твердое ядро планеты) в менее плотную, где расположен исследуемый двухфазный слой, то компактирование частиц идет непосредственно вблизи поверхности ядра. Если же инициированная астероидом УВ проходит сначала через двухфазный слой, а затем достигает твердого ядра планеты и отражается от него, то уплотнение частиц и ядерный взрыв возможны и вдали от внутреннего ядра. Варьирование параметров падающей УВ, размеров частиц и их расположения подтверждает установленную закономерность.

Отметим также, что времена, соответствующие рис. 3 и 4, еще малы для развития неустойчивости границы раздела фаз, поэтому форма частиц диоксида урана за эти времена изменилась незначительно.

ВЫВОД

При прохождении УВ, отраженной от жесткой стенки, так же как и при движении непроницаемого поршня, повышается локальная массовая концентрация тяжелых частиц, что в случае активных частиц может привести к превышению ее критического уровня, а в дальнейшем — к взрыву. Повышение концен-

трации происходит в широком диапазоне начальных параметров смеси.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Анисичкин В. Ф.** Взрываются ли планеты? // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33, № 1. С. 138–142.
2. **Агурейкин В. А., Крюков Б. П.** Метод индивидуальных частиц для расчета течений многокомпонентных сред с большими деформациями // Численные методы механики сплошной среды. 1986. Т. 17, № 1. С. 17–31.
3. **Ивандаев А. И., Кутушев А. Г.** Влияние дисперсных частиц на затухание и взаимодействие с преградами взрывных волн в газовзвесах // Нестационарные течения многофазных систем с физико-химическими превращениями. М.: Изд-во МГУ, 1983. С. 60–79.
4. **Жилин А. А., Федоров А. В.** Отражение ударных волн от жесткой границы в смеси конденсированных материалов. I. Равновесное приближение // ПМТФ. 1999. Т. 40, № 5. С. 73–78.
5. **Жарков В. Н.** Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1983.
6. **Анисичкин В. Ф.** Ударно-волновые данные, как доказательство присутствия углерода в ядре и нижней мантии Земли // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 4. С. 108–114.

Поступила в редакцию 19/V 2000 г.
