

ложения CdCO_3 . С этой целью образец, обжатый в стандартной ампуле, был разделен на три части: на периферический цилиндрический слой (внешний радиус 1,75 мм, внутренний — 1 мм), средний слой (внешний радиус 1, внутренний 0,5 мм) и внутренний осевой цилиндр (радиусом 0,5 мм). Результаты анализа разделенного таким образом материала приведены в табл. 4.

Среднее значение степени разложения вычислялось, естественно, не как среднеарифметическое, а как средневзвешенное с учетом различных объемов трех цилиндрических слоев. Поскольку удельный вес каждой части будет несколько отличаться, причем ближе к центру удельный вес образца будет расти, ясно, что истинное среднее значение процента разложения будет немного выше и сравняется с приведенным в табл. 1 — 66,6% Cd.

Существенным моментом радиальной топографии является факт наличия разложения не только в центре (главная часть), но и на периферии ампулы. Однако преимущественное разложение по оси цилиндра позволяет сделать вывод, что значение давления, полученное термохимическим методом [1], исходя из среднего распределения продукта разложения карбоната кадмия по всей ампуле, следует в несколько раз увеличить (см. [6]).

Полученные количественные результаты будут справедливы только для данного конкретного случая, но качественная картина разложения вещества в обжимаемой цилиндрической ампуле, по-видимому, имеет общий характер.

Таблица 4
Радиальное распределение разложения CdCO_3

ВВ, г	CdCO_3	Номер части ампулы			Σ, %
		1	2	3	
150	1	64,8 5,4	66,7 13,3	75,0 47,9	66,2 11,2
	1,5	64,4 3,8	65,8 9,6	70,7 30,0	65,3 7,5

Примечание. Номера частей ампул идут от периферии к центру.

Поступила в редакцию
4/VI 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. С. С. Бацанов, А. А. Дерибас, С. А. Кутолин. ФГВ, 1965, 2, 52.
2. С. С. Бацанов, А. А. Дерибас и др. ФГВ, 1965, 4, 78.
3. С. С. Бацанов, С. С. Дербенева и др. ФГВ, 1966, 3, 110.
4. С. С. Бацанов, А. А. Дерибас. ФГВ, 1965, 1, 103.
5. С. С. Бацанов, Г. Е. Блохина, А. А. Дерибас. ЖСХ, 1965, 6, 227.
6. С. С. Бацанов, Г. С. Доронин, С. С. Кутателадзе. ПМТФ, 1966, 4, 171.

УДК 532.593

О НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПОВЕРХНОСТИ СЫПУЧЕЙ СРЕДЫ ПРИ СКОЛЬЖЕНИИ ПО НЕЙ УДАРНЫХ И ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН

А. А. Борисов, А. В. Любимов, С. М. Козарко, В. П. Козенко

(Москва)

Экспериментальные исследования взаимодействия скользящей ударной или детонационной волн в газах с поверхностью различных жидкостей показали, что после прохождения скользящей волны свободная поверхность жидкости становится гидродинамически неустойчивой в смысле неустойчивости Кельвина — Гельмгольца [1—3]. Это явление объясняется наличием интенсивного газового потока над слоем и возникновением системы акустических волн сжатия и разрежения в самом слое, дающих начальные искажения поверхности слоя. Развитие неустойчивости с образованием тонкого распыла жидкости в газе наблюдалось не только для различных жидкостей, но и для таких вязких материалов, как технический вазелин. Предлагаемая работа является продолжением подобных исследований на неустойчивость поверхности, но уже сыпучей среды типа песка.

Эксперименты проводились на установках, состоящих из детонационной трубы диаметром 15 мм и длиной 50 см и двух наблюдательных камер: сечением 28×28 мм и длиной 40 см и с размерами 4×50×50 см.

В наблюдательные камеры засыпался песок в виде слоя определенной толщи-

ны h_0 . Песок выбирался с размерами частиц 200—300 мк и плотностью 1,2 г/см³ при естественной засыпке. В этих камерах регистрировался процесс взаимодействия при помощи полутеневого прибора и скоростного фоторегистра СФР-1 в режиме лупы времени.

Исследовалось развитие неустойчивости поверхности слоя песка при различной толщине слоя и двух фиксированных скоростях скользящей волны: а) детонационная волна в смеси 2Н₂+О₂, со скоростью $D=2800$ м/сек, б) ударная волна в воздухе, $D=450$ м/сек. Как и в опытах на неустойчивость поверхности жидкости за скользящей волной [2, 3] в данной работе взаимодействие наблюдалось у торца камеры, там, где газовый поток за фронтом падающей волны действует на поверхность слоя песка конечное время. Затем процесс развития неустойчивости происходит в почти покоящемся газе.

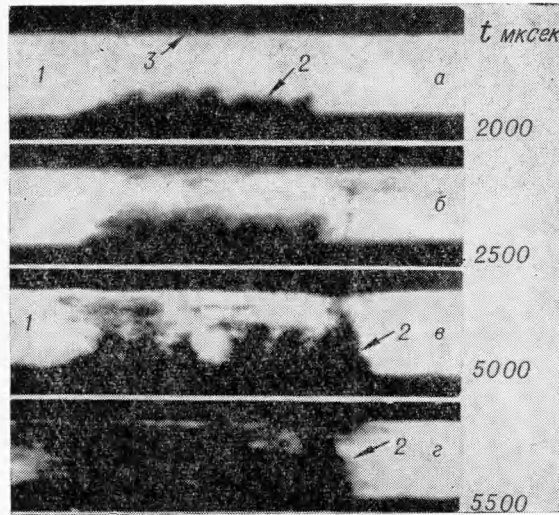


Рис. 1. Развитие возмущений по поверхности слоя песка толщиной $h_0=0,5$ мм после прохождения детонационной волны в смеси 2Н₂+О₂ над слоем.

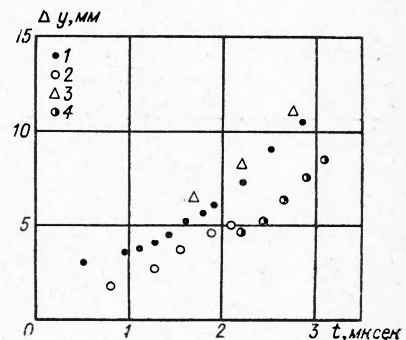
1 — газ; 2 — песок; 3 — камера. Между кадрами 500 и 2500 мксек. Волна прошла слева направо за 2000 мксек от первого кадра.

Для выбранной сыпучей среды (песок) развитие неустойчивости поверхности слоя во времени протекает примерно так же, как и для жидких поверхностей, только с другой скоростью. На рис. 1 показано развитие возмущений на поверхности слоя песка после прохождения над ней детонационной волны. Как и в жидкостях, поверхность слоя песка около 300 мксек остается практически ровной, затем наблюдается подъем с образованием ярко выраженной волнообразной структуры. Средняя скорость подъема песка около 4 м/сек (у жидкости в аналогичных условиях средняя скорость подъема около 20 м/сек [2, 3]). С изменением h_0 меняется картина развития неустойчивости. При сравнительно больших h_0 порядка 3—5 мм уже не наблюдается волнообразная структура, песок поднимается однородно. Аналогичная картина наблюдается при меньших значениях скорости скользящей волны ($D=450$ м/сек). На рис. 2 построены зависимости амплитуды подъема песка от времени при развитии неустойчивости поверхности слоя для различных вариантов (время отсчитывается от момента прихода скользящей волны к слою песка). По результатам экспериментов можно предположить, что причины развития неустойчивости поверхности слоя песка такие же, как и для слоя жидкости [3]. При скольжении фронта волны по поверхности в песке прежде всего развивается присоединенная волна сжатия с давлением за фронтом, совпадающим с давлением за фронтом скользящей волны (рис. 3). Для данного случая взаимодействия скорость скользящей волны D больше, чем скорость упругих волн в песке C (измеренные нами значения C для песка лежат в пределах 200—300 м/сек). Присоединенная волна сжатия в песке очень слабо отклоняется от поверхности слоя:

$$\alpha_1 = \arcsin \frac{C}{D}, \quad \alpha_1 = 5^\circ \text{ для } D = 2300 \text{ м/сек.}$$

Рис. 2. Рост возмущений на поверхности слоя песка во времени после прохождения скользящей волны. Для детонационной волны в смеси 2Н₂+О₂ $D=2800$ м/сек.

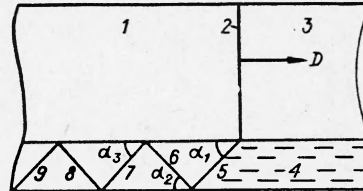
1 — слой на металле, $h_0=0,5$ мм; 2 — слой на металле, $h_0=5$ мм; 3 — слой на тефлоне, $h_0=0,2$ мм; 4 — слой за ударной волной с $D=450$ м/сек, $h_0=0,5$ мм.



Отражаясь от стенок камеры и свободной поверхности песка, эта акустическая волна сжатия приводит к появлению в слое системы акустических волн сжатия и разрежения с характерной длиной $\lambda_0 = 4 h_0 \left(\frac{D^2}{C^2} - 1 \right)^{1/2}$. В ограниченном по длине слое песка этот пакет волн дает систему типа стоячей волны $\lambda_1 = \lambda_0/2$. В нашем случае $D \gg C$, $\lambda_1 \cong 2h_0 \frac{D}{C}$. Для малых h_0 величина λ_1 несколько раз укладывается в длину слоя песка, для сравнительно больших $h_0 \sim 5$ мм λ_1 может стать больше длины песка. Этим и объясняется появление периодической структуры при развитии неустой-

Рис. 3. Схема взаимодействия фронта скользящей волны в газе с поверхностью слоя песка:

1 — сжатый газ или продукты детонации; 2 — фронт волны; 3 — газ или взрывчатая смесь; 4 — слой песка; 5 — акустическая присоединенная волна сжатия в слое песка; 6 — отраженная волна сжатия в слое песка; 7 — отраженная волна разрежения; 8, 9 — волны в системе.



чивости поверхности тонкого слоя песка ($h_0 \cong 0,5$ мм) и отсутствие такой структуры для глубоких слоев ($h_0 \cong 5$ мм).

В большой наблюдательной камере (с размерами $4 \times 50 \times 50$ см) были поставлены опыты по взаимодействию скользящей ударной волны с поверхностью очень глубокого слоя песка ($h_0 = 300$ мм). Для такого слоя практически не наблюдалось развитие неустойчивости поверхности при скоростях ударной волны 450 м/сек. Это легко объяснить отсутствием в глубоком песке системы начальных периодических возмущений. Чисто флуктуационные возмущения не могут обеспечить необходимую скорость развития неустойчивости за то конечное время, в течение которого над песком существует газовый поток (это время порядка 400 мксек).

В условиях настоящих опытов поверхность песка находится глубоко в области неустойчивости (критические скорости газового потока для развития неустойчивости не измерялись, но, по-видимому, лежат в пределах 10 – 20 м/сек). Наблюдаемая стадия развития неустойчивости (см. рис. 2) — это уже нелинейная стадия конечных возмущений поверхности песка (начальная стадия развития возмущений с их ростом по закону e^{at} , где $a > 0$, не наблюдалась из-за малости возмущений поверхности). Именно этим можно объяснить почти постоянное значение скорости роста возмущений (порядка 4 м/сек). На рис. 2, 4 показан рост возмущений и для случая взаимодействия с тонким слоем песка скользящей ударной волны со сравнительно малой скоростью. Наблюдаемое запаздывание начала заметного роста возмущений можно объяснить меньшей скоростью газового потока за фронтом волны и более слабыми начальными возмущениями в слое песка.

Для того чтобы более однозначно говорить о причинах развития неустойчивости поверхности слоя песка за скользящими волнами и устранить возможное влияние металлической стенки, на которой лежит песок (упругие волны по металлу стенки могут воздействовать на слой песка), была исследована на неустойчивость поверхность слоя песка, лежащего на тефлоновой пластинке, которая крепилась по оси наблюдательной камеры на ножках из пластилина. Неустойчивость в этом случае развивалась так же, как на металле (см. рис. 2).

Были поставлены также опыты, в которых тонкий слой песка покрывался очень тонкой алюминиевой фольгой. Эта фольга при взаимодействии устраняла непосредственный контакт газового потока за фронтом волны и поверхности слоя песка, остальные моменты взаимодействия сохранялись. В этих условиях практически не наблюдалось искажение поверхности песка, закрытого фольгой. Фольга при взаимодействии не смещалась, только на самой ее поверхности оставались вмятины от песчинок снизу.

Как и для жидкостей явление неустойчивости поверхности слоя сыпучей среды можно тесно связать с возможностью развития воспламенения гетерогенных систем типа тонкий слой горючей сыпучей среды — газообразный окислитель за ударными волнами. Работа в этом направлении ведется в настоящее время.

Поступила в редакцию
6/VI 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. Гидродинамическая неустойчивость. Сб. статей. М., ИЛ, 1964.
2. А. А. Борисов, С. М. Когарко, А. В. Любимов. Докл. АН СССР, 1965, 164, 1, 125.
3. А. А. Борисов, С. М. Когарко, А. В. Любимов. ФГВ, 1965, 4, 32.