

влияние скорости выхода ВВ из заданного состояния (или градиента спада давления) проявляется больше при меньшей величине t_0 .

Влияние градиента спада давления может быть объяснено следующим образом [2]. В состоянии с давлением $p_{фр}$ (или концентрацией внутренней энергии $\epsilon_{фр}$) химическая реакция взрывчатого превращения проходит еще недостаточно глубоко. При быстром спаде давления так же быстро уменьшаются плотность и температура, поэтому химическая реакция обрывается. Напротив, при медленном спаде давления плотность и температура медленно уменьшаются, продолжается химическая реакция взрывчатого превращения и возбуждается процесс детонации.

Таким образом, при рассмотрении задачи инициирования ВВ ударными волнами малой длительности необходимо учитывать не только значения $p_{фр}$ (или $\epsilon_{фр}$) и t_0 , но также и скорость, с которой ВВ выходит из состояния ударного сжатия.

Поступила в редакцию
24/IX 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. К. Юхансон, П. Персон. Детонация взрывчатых веществ. М.: Мир, 1973.
2. А. Н. Дремин, С. Д. Савров и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970.
3. Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев. Иницирование твердых взрывчатых веществ ударом. М.: Наука, 1968.
4. М. Я. Васильев. ФГВ, 1965, 1, 3.
5. С. Н. Буравова, А. Н. Дремин. ФГВ, 1971, 7, 1.
6. А. В. Дубовик, В. К. Боболев. Докл. АН СССР, 1975, 222, 3.
7. Y. de Longueville, C. Fauquignon, H. Moulard. 6-th Symp. (International) on Detonation. California, 1976.
8. P. Howe, R. Frey et al. 6-th Symp. (International) on Detonation. California, 1976.
9. R. H. Stresau, J. E. Kennedy. 6-th Symp. (International) on Detonation. California, 1976.
10. А. П. Погорелов, Б. Л. Глушаки др. ФГВ, 1977, 13, 2.
11. Ю. В. Батюков, С. А. Новикови др. ФГВ, 1979, 15, 5.
12. N. E. Hoskin, I. W. Allan et al. 4-th Symp. (International) on Detonation. Maryland, 1965.
13. А. А. Дерibas. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1972.
14. А. П. Погорелов, Б. Л. Глушак и др. ФГВ, 1977, 13, 5.
15. Compendium of Shock Waves Date, Section C. Univ. of California, 1977.
16. K. A. Gschneidner. Solids State Phys., 1964, 16.
17. Compendium of Shock Wave Date. Univ. of California, 1966.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВЗРЫВА В РАСПЛАВЛЕННЫХ СОЛЯХ

Г. Я. Алешин, В. Ф. Зайцев, С. М. Шестаков
(Ленинград)

Одной из важных проблем, решение которой повысит безопасность эксплуатации содорегенерационных котлоагрегатов в целлюлозно-бумажной промышленности является проблема борьбы со взрывом, возникающим при разрыве экранных труб и попадании воды в расплав солей: NaCl , Na_2SO_4 , Na_2S и др. В результате контакта воды с расплавом, имеющим температуру $\sim 1100\text{K}$, происходит взрыв, приводящий к выходу из строя оборудования и прекращению технологического процесса производства целлюлозы [1—3].

В настоящее время еще нет достаточно четкого представления о механизме физических процессов, приводящих к взрыву. В большинстве опубликованных работ [1—3] считается, что причиной взрыва, как и в металлургии является мгновенное вскипание воды с резким увеличением объема и давления. Необходимое условие при этом — проникновение воды в массу расплава таким образом, что вода оказывается замкнутой в объеме, близком к сферическому. Однако указанным механизмом не удается объяснить причины, по которым Na_2CO_3 не взрывается при тех же условиях, при которых взрывается NaCl . Имеются данные, что некоторые другие расплавы солей также не взрываются при попадании в них воды.

Таким образом, для обеспечения безопасной эксплуатации содорегенерационных котлоагрегатов оказывается необходимым проведение специальных исследований с детальным изучением физического и химического механизмов процесса взрыва расплавленных солей. В настоящей работе приводятся некоторые новые экспериментальные данные о развитии процесса взрыва в расплавленных солях и сделана попытка объяснения наблюдаемых фактов.

Опыты проводились на двух экспериментальных установках, схематично показанных на рис. 1. Соль, преимущественно NaCl , расплавлялась в печи и перегревалась до температуры 1220—1270К в керамических тиглях и кварцевых стаканах. На первой установке (рис. 1, а) расплав вынимался из печи и устанавливался на специальную подставку, на второй (рис. 1, б) — опыты проводились непосредственно в печи в атмосфере аргона. Для фиксации изменения яркостной температуры стенки тигля был применен фотодиод ФД-2, направленный на стенку тигля так, чтобы исключалась возможность попадания какого-либо постороннего излучения. Сигнал от фотодиода регистрировался шлейфным осциллографом Н-115 на шлейфах с собственной частотой 300 Гц, со скоростью протяжки бумаги 0,05 м/с. Кроме того, опыты, проведенные в кварцевых стаканах, и некоторые опыты в керамических тиглях дополнительно снимались на киноплёнку камерой СКС-1 со скоростью 1000 кадр/с. Кварцевый стакан или керамический тигель устанавливались между источником света и кинокамерой. Вода дозировалась с помощью пипетки, установленной по оси стакана или тигля.

Опыты на первой экспериментальной установке показали, что соприкосновение воды с расплавом не всегда приводит к взрыву. В связи с этим по аналогии с [4], все опыты условно были разбиты на три группы. Первая группа названа взрывом и характеризовалась разрушением кварцевых стаканов и керамических тиглей, выбросом расплава и сильным по уровню звуком. Вторая группа названа «хлопком» и отличалась от первой тем, что кварцевый стакан и керамический тигель оставались целыми, но часть расплава вылетала из сосуда. В третьей группе опытов отсутствовал выброс расплава и звуковой эффект. Следует отметить, что в некоторых опытах данной группы после кристаллизации соль NaCl имела розовый оттенок. Однако, несмотря на внешние различия, все проведенные опыты имели одинаковый характер изменения интенсивности излучения, которое фиксировалось фотодиодом. На рис. 2, 2 представлена осциллограмма изменения интенсивности излучения стенки керамического тигля, на которой видны основные стадии развития процесса (опыты относятся к третьей группе). Первая стадия — уменьшение интенсивности излучения, вторая — увеличение ее до уровня выше первоначального значения и третья — падение интенсивности излучения.

Эта осциллограмма показывает, что модель вскипания капли воды, попавшей в массу расплава, не может служить объяснением процесса возникновения взрыва, так как интенсивность излучения в конце второго участка (качественно характеризующая изменение температуры стенки тигля) превышает начальное значение. Температура стенки тигля повы-

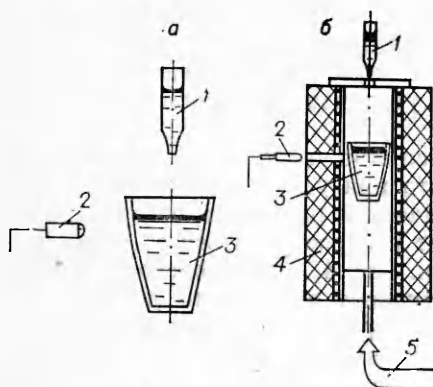


Рис. 1. Экспериментальные установки 1 (а) и 2 (б).

1 — вода; 2 — фотодиод; 3 — расплав соли; 4 — печь; 5 — аргон.

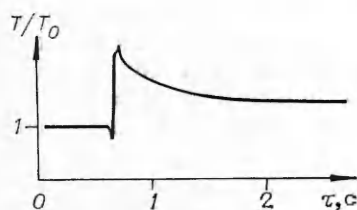


Рис. 3. Изменение интенсивности излучения стенки керамического тигля при взрыве в печи (расплав — вода); T — текущая температура, T_0 — температура в печи.

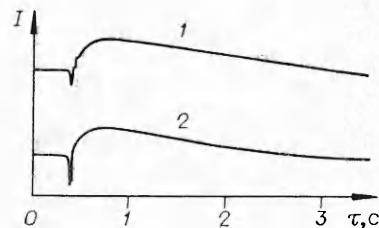


Рис. 2. Изменение интенсивности излучения стенки керамического тигля.

1 — расплав — стальной шарик; 2 — расплав — вода.

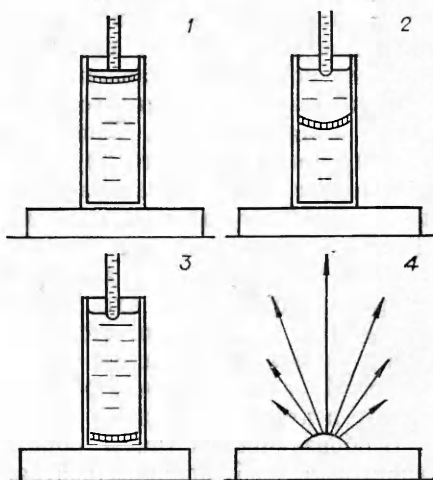


Рис. 4. Схема процесса, наблюдаемого при кинорегистрации.

1) через $\tau = 10^{-3}$ с после контакта воды с NaCl; 2) $\tau = 2 \cdot 10^{-3}$ с; 3) $\tau = 4 \cdot 10^{-3}$ с; 4) $\tau = 5 \cdot 10^{-3}$ с.

пается на несколько десятков градусов (см. рис. 2), в то время как процесс вскипания должен сопровождаться только понижением температуры.

Дальнейшие исследования были направлены на изучение химической стороны наблюдаемого явления. Возможные химические реакции в данном случае могут быть реакциями между NaCl и водой или NaCl, водой и кислородом воздуха. Опыты проводились на установке рис. 1, б в печи в атмосфере аргона. Характер изменения интенсивности излучения во времени (рис. 3) для взрыва в керамическом тигле этой серии опытов аналогичен первой серии, проведенной в воздушной среде. Это указывает на отсутствие влияния кислорода воздуха.

Следующая серия опытов проводилась на экспериментальной установке рис. 1, а при контакте расплавленной соли NaCl с различными материалами: сталью, латунью, медью, алундом и кусочком монокристалла NaCl. Указанные материалы бросались с высоты примерно 0,25—0,30 м. Осциллограмма изменения интенсивности излучения стенки керамического тигля при контакте расплавленной соли NaCl со стальным шариком представлена на рис. 2, 1. Как видно, данная осциллограмма имеет одинаковый характер с осциллограммой взаимодействия с водой. Проведенные опыты свидетельствуют о том, что на наблюдаемый процесс не оказывают существенного влияния окружающая среда и материал, входящий в контакт с расплавом. Представленные осциллограммы не могут быть также объяснены с точки зрения реализации модели метастабильного состояния.

Покадровая обработка киноплёнки (опыты в керамическом тигле) показывает, что при контакте расплава с водой стенка тигля сначала тускнеет, а затем разогревается и происходит взрыв. Интенсивность излучения стенки спадает за $(3 \div 4) \cdot 10^{-3}$ с, а увеличение интенсивности — за $(2 \div 3) \cdot 10^{-3}$ с.

Покадровая обработка киноплёнки опытов в кварцевых стаканах, представленная на рис. 4, показывает, что при ударе о поверхность расплава возникает волна увеличенной оптической плотности расплава, толщиной $(1 \div 1,5) \cdot 10^{-3}$ м, которая начинает распространяться со скоростью ~ 13 м/с. При достижении волной дна (см. рис. 4, 3, 4) происходит взрыв. Следует отметить, что при просмотре кинолент видно, что до волны и после нее расплав имеет одинаковую прозрачность, т. е. находится в жидком состоянии. Это хорошо видно при выбросе расплава из сосуда.

Такой характер осциллограмм и процессов, наблюдаемых при просмотре кинолент, удовлетворительно может быть описан следующей моделью: при ударе любого предмета о поверхность расплава возникает локальное повышение давления, которое оказывается достаточным для осуществления виртуального фазового перехода жидкость — кристалл тонкого слоя расплава. При этом выделяется энергия, эквивалентная скрытому теплу фазового перехода. Эта волна локального давления распространяется в глубь расплава, инициируя фазовый переход жидкость — кристалл в следующих слоях расплава, т. е. порождая тем самым энтропийную волну. В зоне за волной происходит декристаллизация (восстановление жидкой фазы), а энергия, необходимая для этого, отбирается от окружающей среды, что фиксируется на осциллограмме понижением интенсивности излучения стенки тигля. Волна кристаллизации видна на кадрах киноплёнки в виде слоя с повышенной оптической плотностью (см. рис. 4), а ее движение обуславливается разностью удельных объемов жидкого и кристаллического состояний соли.

В образующейся таким образом энтропийной волне квазикристалл находится в возбужденном состоянии за счет поглощенной энергии кристаллизации. В щелочно-галогенидных солях, в частности в NaCl, весьма вероятна локализация возбуждения на отрицательных ионах решетки в виде сильносвязанных экситонов (экситонов Френкеля [5]), которые могут перемещаться в квазикристалле подобно волне.

При достижении волной дна сосуда происходит мгновенная рекомбинация экситонов и выделение накопленной энергии волны в виде электромагнитного излучения. Этот момент характеризуется резким (выше начального уровня) увеличением интенсивности излучения, зафиксированным на осциллограммах.

Если экситоны рекомбинируют одновременно, происходит взрыв; чем «несинхроннее» рекомбинация, тем меньше энергетический эффект, так как «пережившие» столкновение с дном тигля экситоны рекомбинируют, образуя дефекты кристаллической структуры (при застывании расплава), а не испуская ультрафиолетовое излучение [6] (на что указывает, например, розовый оттенок кристаллической соли NaCl, полученный в некоторых экспериментах третьей группы опытов). При этом наблюдается повышение интенсивности излучения, но ни взрыва, ни «хлопка» не происходит. «Хлопок» занимает промежуточное положение между взрывом и образованием дефектной кристаллической структуры — энергетический эффект недостаточен для разрушения керамического тигля или кварцевого стакана, но большая часть экситонов рекомбинирует с испусканием ультрафиолетового излучения.

В расплаве Na_2CO_3 энтропийная волна не может накапливать достаточный для взрыва или «хлопка» запас энергии, так как в кристаллах Na_2CO_3 экситоны не образуются, а другие механизмы запаса энергии (поляроны и др.) оказываются, по-видимому, не эффективными. Соотно-

шение, связывающее количество накопленной энергии в волне с массой, через которую она прошла, можно записать в следующем виде:

$$dQ = T(S_{\text{ж}} - S_{\text{к}})dm,$$

где Q — количество накопленной энергии; T — температура расплава; $S_{\text{ж}}$ — энтропия жидкой фазы; $S_{\text{к}}$ — энтропия кристаллической фазы; m — масса, через которую прошла волна.

Количество энергии, выделяющейся в опытах со взрывом, может быть оценено следующим образом: для нагрева тигля на 200° за $3 \cdot 10^{-3}$ с необходима энергия порядка 10 кДж [7], для выброса расплава массой $59 \cdot 10^{-3}$ кг из тигля требуется энергия ~ 10 кДж (учитывая, что при разлете расплава слышен звук, характерный для случая преодоления звукового барьера, скорость разлета расплава принята равной скорости звука); для разрушения тигля и создания звукового эффекта необходимо затратить количество энергии, равное ~ 2 кДж.

Таким образом, общее количество выделившейся при взрыве энергии можно оценить для наших опытов в ~ 22 кДж. Энергия скрытого тепла фазового перехода жидкость — кристалл для одного моля NaCl равна 30,3 кДж. Масса расплава в тиглях составляла примерно 1 моль, так что энергетический эффект взрыва соответствует энергии полной перекристаллизации вещества расплава за вычетом потерь от рекомбинации части экситонов с образованием дефектной кристаллической структуры.

Таким образом, проведенные исследования процесса взрыва при падении воды в расплавленные соли показывают, что развитие данного процесса не удастся объяснить с позиции «вскипания», химической модели и реализации метастабильного состояния. Предлагаемая в общем виде модель удовлетворительно описывает все стадии развития взрыва, а построенные на ее основе количественные оценки находятся в разумном соответствии с реальным энергетическим эффектом процесса.

Авторы выражают искреннюю благодарность А. А. Таракановскому за ценные замечания в процессе проведения экспериментов.

Поступила в редакцию
24/II 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. G. Long. Explosions of Molten Aluminum in Wastes, Cause and Prevention. Metal Progress, May, 1957.
2. J. A. Sallack. Pulp and Paper Magazine of Canada, 1955, 56, 10, 114.
3. Ю. Н. Корчунов, Б. Ф. Фролов. Тр. ЦКТИ, вып. 149, Л., 1977.
4. А. Ф. Беляев. Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем. М.: Наука, 1968.
5. Ч. Киттель. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978.
6. Ч. Б. Лушник, И. К. Витол, М. А. Эланго. УФН, 1977, 122, 2, 223.
7. Б. А. Григорьев. Импульсный нагрев излучением. М.: Наука, 1974.

ПАРАМЕТРЫ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПРИ ВЗРЫВЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА ВВ В ВОЗДУХЕ

А. А. Васильев, С. А. Ждан
(Новосибирск)

В настоящее время принято, что инициирование детонации во взрывчатой газовой смеси определяется не только полной энергией источника, но и пространственно-временными характеристиками энерговыделения. Из различных источников инициирования (взрывающаяся проволока,