

УДК 534.222.2 (575.2) (04)

**РОЛЬ ВСПЕНЕННОГО ПОЛИСТИРОЛА
В РАЗВИТИИ ПЕРВИЧНЫХ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ
В ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЕ НИЗКОПЛОТНЫХ
ВЗРЫВЧАТЫХ СМЕСЕЙ**

В.И. Нифадьев – акад., докт. техн. наук, проф.,
Н.М. Калинина – докт. техн. наук, проф.

The results of the experimental researches of the mechanism of excitement primary reaction in detonation wave explosive mixtures of density 0,15–0,5 g/sm³, contained a foamed polystyrene, are described. Is established, that products of gasification of a foamed polystyrene possess the high chemical activity, revealing in condition of super-low temperature and pressures in zone of the chemical reaction. In base primary chemical reaction lies the mechanisms an chemical ionization and selfacceleration.

Введение. В 50-е годы XX в. американскими и параллельно советскими учеными было установлено, что детонация высокобризантных взрывчатых веществ (ВВ) сопровождается возникновением значительного импульса электрического напряжения, регистрируемого в различных проводниках и сигнальных зондах, располагавшихся вблизи заряда ВВ. Например, при детонации зарядов из прессованного тетрила диаметром 2,5 см и длиной 2,5 см при использовании в качестве сигнальных зондов сетчатых цилиндров диаметром 3 см, расположенных концентрически к заряду, получали полную величину импульса напряжения около 5 кВ. При использовании экранирующих цилиндров диаметром 5 см вместо 2,5 см и при заполнении пространства между зарядом и экраном обычной поваренной солью были получены высокие значения полного импульса порядка 20 кВ [1]. Кроме того, при детонации ВВ было обнаружено электромагнитное излучение, энергия которого выше тех значений, которые можно было бы ожидать на основе излучения продуктов детонации, рассматриваемых как черное тело.

При исследовании электромагнитных явлений, сопровождающих взрыв конденсированных ВВ, последний рассматривался как комплекс, включающий процессы детонации, образования и движения продуктов детонации и воздушной ударной волны. Экспериментально зарегистрированы сигналы, индуцированные областью взрыва и обусловленные различными механизмами, способными привести к образованию электрических зарядов и электромагнитного излучения. Экспериментальные исследования, проводимые с целью анализа электромагнитных явлений при взрыве, были направлены на изучение двух нестационарных процессов: образование электрических зарядов и электрических полей в продуктах детонации и в воздушной ударной волне; воздействие этих полей на искусственно создаваемые однородные электрические поля. Такой способ анализа проблемы не позволил установить отдельные физические явления, способные привести к появлению электромагнитных полей при взрыве конденсированных ВВ, и выявить роль каждого явления в отдельности [2].

Измерения электрической проводимости в детонационной волне ВВ пониженной плотности, таких, как тринитротолуол (грубодисперсный и молотый), гексоген, тетрил, амматол 80/20 и др., показали значения проводимости даже более высокие, чем значения, полученные для хороших полупроводников. Экспериментально было доказано, что в некоторых наиболее интенсивных детонационных волнах плотность электронов может достигать значений, больших 10^{20} на 1 см^3 [1]. При рассмотрении известных методов ионизации было сделано заключение, что единственным механизмом, по которому может происходить ионизация наблюдаемой интенсивности при химической реакции в детонационной волне, является *хемионизация*. Было установлено также, что при детонации указанных ВВ в детонационной волне образуются промежуточные продукты детонации в плазмы, отличающиеся метастабильностью, т.е. довольно высокой продолжительностью “жизни” в возбужденном состоянии.

Исследования, проведенные авторами [3], показали, что метастабильные плазмы образуются не только при детонации ВВ средней мощности, но также и при детонации низкоплотных взрывчатых смесей, содержащих в своем составе гранулированную аммиачную селитру и вспененный полистирол и отличающихся большой неоднородностью компонентного состава по плотности и чувствительности к ударно-волновому воздействию. Необъяснимым с точки зрения классических представлений гидродинамической теории детонации является незатухающее протекание детонации в зарядах простейших взрывчатых смесей сверхнизкой плотности ($0,15 \div 0,2\text{ г/см}^3$). Парадоксальным является и то, что при детонации низкоплотных и сверхнизкоплотных смесей также генерируются метастабильные плазмы. Продолжительность жизни этих плазм зависит от плотности заряда. Поскольку расчетные значения давления и температуры в зоне химической реакции находятся далеко за пределами детонации для конденсированных ВВ, было сделано предположение, что возможность детонации низкоплотных смесей, содержащих в своем составе достаточно инертную, более того, гранулированную аммиачную селитру, мо-

жет обеспечиваться только особыми химическими свойствами вспененного полистирола.

Физико-химические свойства пенополистирола. Пенополистирол (ППС), как углеводород, состоит из 89,8% углерода, 8% водорода, 0,18% серы, 0,21% азота, 1,8% кислорода и представляет собой полимер стирола, в гранулы которого в процессе полимеризации введен порообразователь изопентан с температурой кипения $27,9^\circ\text{C}$. Изопентан равномерно распределен в массе полистирола в мелких ячейках размером $30 \div 50\text{ мкм}$. При нагреве до 100°C полистирол размягчается и становится эластичным, а изопентан переходит в газообразное состояние, расширяется и увеличивает в объеме бисерный полистирол в $10 \div 140$ раз, в зависимости от температуры и времени выдержки и технологии вспенивания. Скорость и величина вспенивания гранул зависят от соотношения между внутренним давлением изопентана, атмосферным давлением, вязкостью размягченного полистирола.

ППС представляет собой особый вид материала, отличающегося выраженной неоднородностью, своеобразием микроструктуры, напоминающей структуру пены. Диаметр исходного бисера находится в пределах $0,2 \div 2,5\text{ мм}$. В 1 см^3 вспененного полистирола заключено около 5 тыс. ячеек. Толщина стенки ячейки $2,5 \div 5\text{ мкм}$, что соответствует 5–10% твердого вещества по объему. ППС состоит из более или менее правильно чередующихся слоев полимерной основы, образующей стенки ячеек, наполненных газом. Физическая неоднородность, чередование твердой и газообразной фаз обуславливают специфические свойства материала. Из числа факторов, характеризующих структуру ППС и определяющих его свойства, основными являются геометрическая форма и размеры ячеек, свобода перемещения газообразной фазы, относительное содержание полимерной и газообразной фаз. ППС обладает малой теплоемкостью ($2,1\text{ кДж/кг}\cdot^\circ\text{град}$) и теплопроводностью ($0,12 \div 0,17\text{ кДж/м}\cdot^\circ\text{град}$). При нагревании полистирол способен к термической деполимеризации; теплота полимеризации составляет $32,76\text{ кДж}$ на основную молекулу, теплота испарения и разложения – 33 кДж/моль . При 164°C он плавится, при 316°C – испаряется, хотя и незначительно; при $560 \div 576^\circ\text{C}$ медленно горит.

Специфическими свойствами вспененного полистирола являются его высокая сжимаемость и упругость. Более подробное описание физико-химических свойств пенополистирола приведено в работах [4–7].

Особенности ударно-волновой газификации вспененного полистирола. С целью изучения свойств продуктов ударно-волнового разложения ППС было проведено несколько серий взрывов в стеклянных трубах и сосудах различной формы с регистрацией процесса с помощью СФР в режиме лупы времени с интервалом времени между кадрами 8 мкс. Взрывание ППС различной плотности осуществлялось в тонкостенных стеклянных трубках диаметром 30 мм. Установлено, что при газификации ППС резко выражен импульсный характер процесса – на одном кадре выделяется несколько зон с различной интенсивностью свечения (рис. 1). Интенсивность свечения зависит от плотности гранул ППС. При рассмотрении зоны разогрева и газификации ППС плотностью $0,006 \text{ г/см}^3$ можно видеть, что в результате воздействия боевика в заряде формируются две зоны разогрева ППС, в которых различаются несколько светящихся полос различной ширины, разделенных темными парал-

лельными полосами шириной 2–5 мм. Ширина каждой зоны равна 35–40 мм, расстояние между ними примерно 30 мм. На одном кадре выделяются несколько зон с различной интенсивностью свечения. Интенсивность свечения зависит от плотности гранул ППС.

При газификации ППС плотностью $0,025 \text{ г/см}^3$ светящийся участок состоит из двух зон шириной примерно 40 мм (рис. 2), однако структура и яркость каждой зоны существенно отличаются от предыдущих кадров. Различается большое количество ярко светящихся сферических образований. Участки с различной интенсивностью свечения имеют большие размеры, чем в первом случае. Такую разницу в структуре зон газификации ППС различной плотности можно объяснить тем, что в случае воздействия на сверхлегкий ППС процесс его газификации протекает гораздо быстрее в сравнении с более тяжелым ППС; кроме того, на общую картину процесса существенно влияет гранулометрический состав ППС. У сверхлегкого ППС размер гранул в диаметре изменяется в широком диапазоне – от 2–3 мм до 2–3,5 см. При сжатии основная нагрузка приходится на наиболее крупные гранулы,

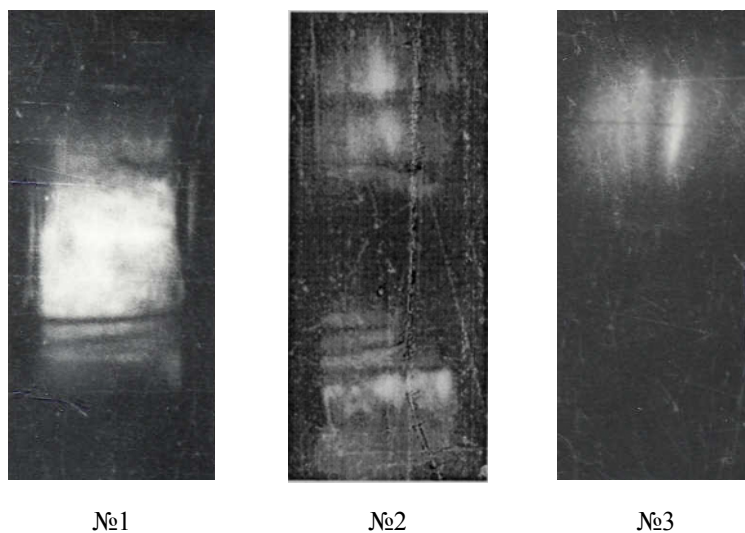


Рис. 1. Характер свечения зоны газификации ППС плотностью $0,006 \text{ г/см}^3$ при взрывании в тонкостенных стеклянных трубках диаметром 30 мм.

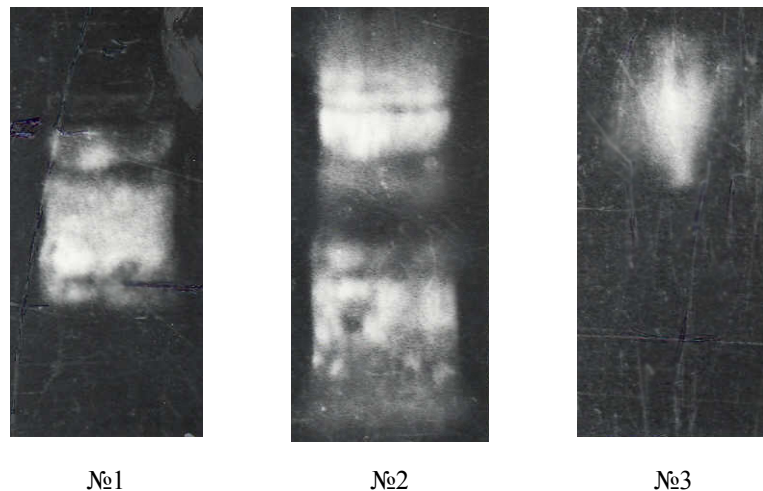


Рис. 2. Характер свечения зоны газификации ППС плотностью $0,025 \text{ г/см}^3$ при взрывании в тонкостенных стеклянных трубках диаметром 30 мм.

вследствие чего они газифицируются в первую очередь. В качестве примера на рис. 3 показаны спекшиеся гранулы ППС, обнаруженные после слабого ударноволнового воздействия на заряд из пенополистирола. Для обеспечения разложения ППС в результате сжатия и исключения участия в этом процессе высокотемпературных струй продуктов взрыва боевика или лучистого потока между боевиком и зарядом из пенополистирола помещалась стальная шайба толщиной $0,7\text{--}1,0 \text{ см}$. Крупные гранулы разложились до газообразных компонентов и сажи, а мелкие оплавилась с поверхности и спеклись между собой.

Характерной для процесса газификации ППС является различная интенсивность свечения гранул, находящихся в пределах одной зоны и даже одного слоя. Внутренняя часть при этом в течение какого-то промежутка времени остается затемненной. Примерно через $2\text{--}4 \text{ мкс}$ с начала свечения поверхности гранула внезапно ярко вспыхивает и дальнейший нагрев сопровождается интенсивным свечением гранулы в течение 8 мкс . Судя по характеру свечения и исходя из чувствительности используемой фотопленки, можно сказать, что гранулы ППС разогреваются до температур, значительно превышающих не только темпе-

ратуру испарения полистирола, которая при атмосферном давлении равна 576°C , но и температуру взрыва смеси типа АС-ППС плотностью $0,15\text{--}0,2 \text{ г/см}^3$, расчетное значение которой находится в диапазоне $2000\text{--}2300^\circ\text{C}$. Интенсивность свечения в зоне газификации ППС резко увеличивается при нанесении на его гранулы водного раствора хлористого натрия (рис. 4).

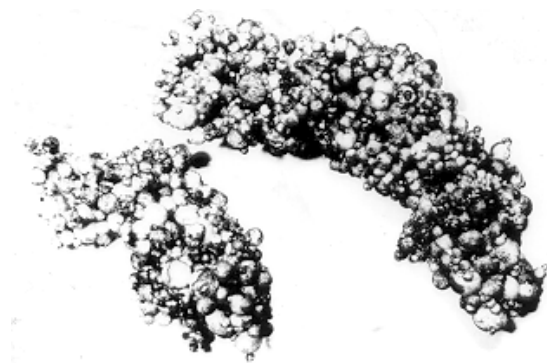


Рис. 3. Остатки спекшихся гранул ППС, образовавшиеся в результате ударноволнового воздействия на заряд через стальную шайбу, помещенную между боевиком и пенополистиролом. Насыпная плотность заряда – $0,015 \text{ г/см}^3$.

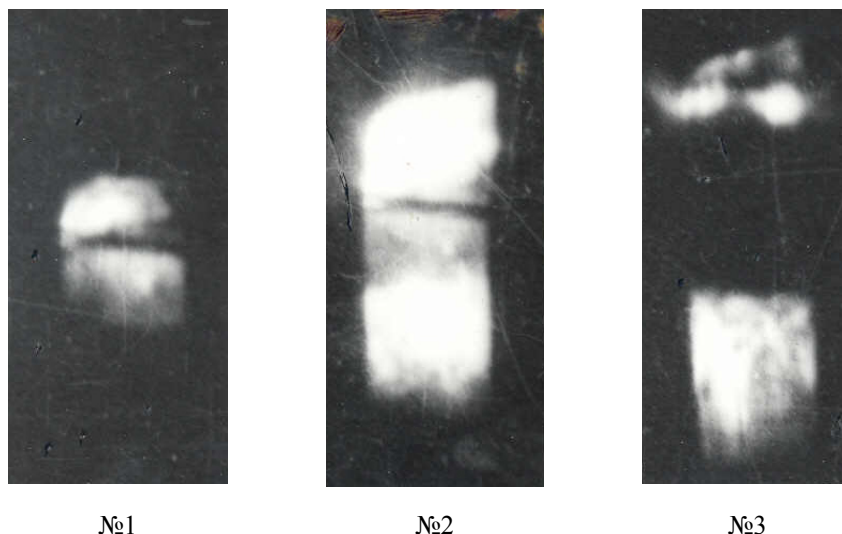


Рис. 4. Усиление интенсивности свечения зоны газификации ППС плотностью $0,006 \text{ г/см}^3$ при нанесении на его гранулы водного раствора хлористого натрия.

Образование метастабильных плазм при ударноволновой газификации ППС. С целью изучения свойств продуктов газификации пенополистирола было проведено несколько серий взрывов с регистрацией процесса с помощью скоростного фоторегистратора СФР-2 в режиме лупы времени. Взрывание проводилось в стеклянном сосуде диаметром 200 мм с толщиной стенок 3 мм. Насыпная плотность ППС равнялась примерно $0,006 \text{ г/см}^3$. Инициирование осуществлялось аммонитом 6ЖВ, навеска которого массой 100 г была равномерно распределена на дне сосуда с внутренней стороны. В верхней части сосуда закрыт полиэтиленовой крышкой, в которую была вставлена резиновая пробка с отверстием под стеклянную трубку, разветвленную на две части (рис. 5). Отдельные кадры (рис. 6) получены при съемке процесса газификации ППС по указанной схеме.

Установлено, что зона газификации вблизи боевика ярко светится. Различаются отдельные гранулы ППС. По мере удаления от боевика интенсивность свечения уменьшается и при подходе к горлышку сосуда практически исчезает. Через 88 мкс после инициирования процесса ставшие невидимыми продукты газификации прожигают полиэтиленовую крышку и зависают в воздухе в виде ярко све-

тящегося пульсирующего сгустка. Отсутствие остатков крышки после взрыва позволило прийти к выводу, что вещество крышки, испарившись, вместе с продуктами взрыва сформировало светящийся сгусток над сосудом. К моменту прорыва продуктов газификации в воздух при большем увеличении снимка хорошо различаются контуры стеклянной трубки, через которую затем начинают выходить ярко светящиеся продукты газификации, формируя в воздухе плазменное облако.

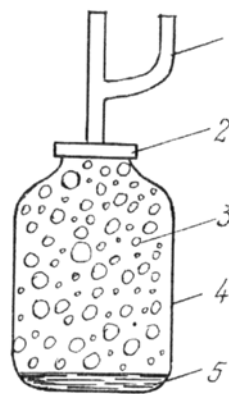


Рис. 5. Конструкция заряда при взрывании ППС плотностью $0,006 \text{ г/см}^3$: 1 – тонкостенная стеклянная трубка; 2 – полиэтиленовая крышка; 3 – ППС; 4 – стеклянный сосуд; 5 – аммонит 6 ЖВ.

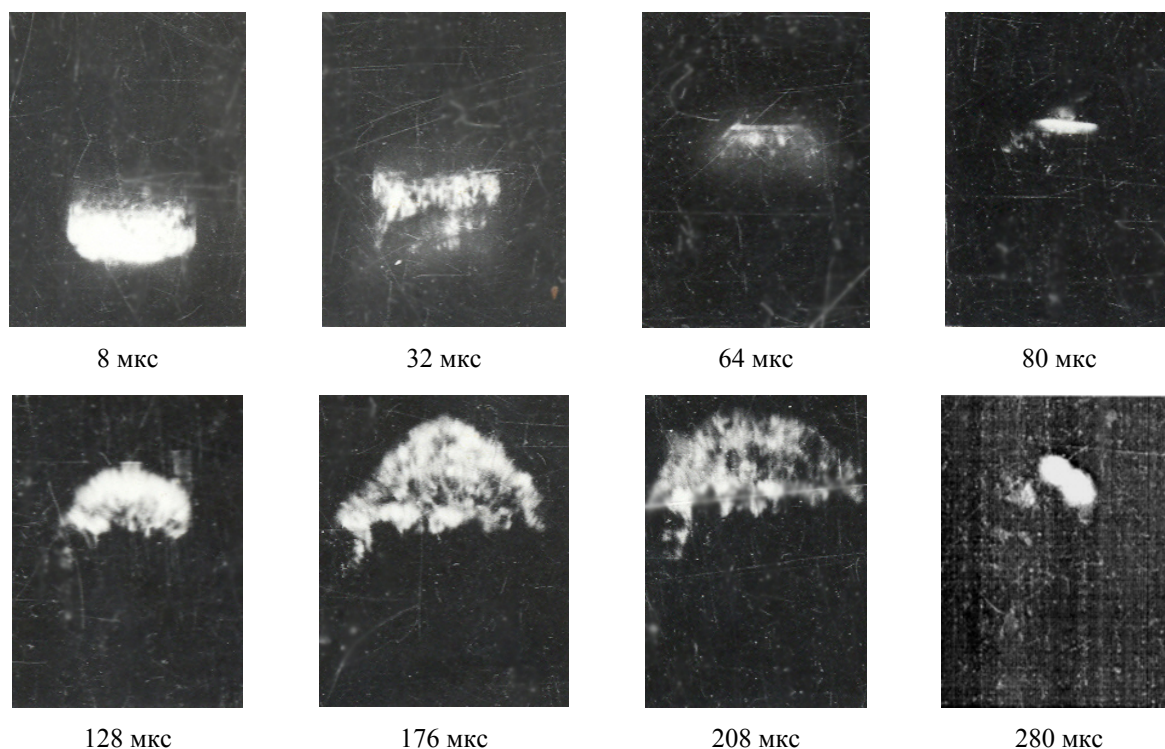


Рис. 6. Отдельные кадры скоростной фотосъемки процесса газификации ППС насыпной плотностью $0,006 \text{ г/см}^3$ в стеклянном сосуде диаметром 200 мм. Масса боевика – 100 г.

Многочисленные опыты показали, что при распространении в ограничивающих трубках продукты газификации не разрушают их, а, принимая форму трубок, меняют направление своего движения соответственно их конфигурации. При переходе продуктов газификации в трубку с меньшим диаметром интенсивность свечения резко возрастает, при расширении диаметра трубки – уменьшается. При резком сужении трубки (с 30 до 8 мм в диаметре) и последующем выходе в воздух плазма разрушается, о чем свидетельствует исчезновение свечения на выходе трубки. Высокая проводимость продуктов газификации, определенная с помощью датчиков ионизации, яркость свечения, длительность существования в связанном состоянии, способность перемещаться по тонким стеклянным трубкам, принимая их форму, свидетельствуют о том, что продукты газификации некоторое время после образования существуют в виде субстанции, аналогичной внешней плазме, описанной М. Куком в теории плазменной детонации [1].

Влияние внешнего электрического поля на процесс газификации пенополистирола.

Было сделано предположение, что, поскольку продукты газификации, образующиеся при детонации, существуют в течение довольно длительного времени в плазменном состоянии, на характер их образования и распространения по заряду существенное влияние должно оказывать внешнее электрическое поле. Была проведена серия экспериментов, в которых взрывание сверхлегкого ППС насыпной плотностью $0,005 \div 0,006 \text{ г/см}^3$ осуществлялось в стеклянных сосудах диаметром 200 мм (рис. 5). Верхняя треть сосуда с зарядом помещалась между вертикально установленными жестяными пластинами, на которые подавалось напряжение 1,2 кВ. Расстояние между пластинами составляло 24 см, напряженность создаваемого постоянного электрического поля равнялась примерно $0,05 \text{ кВ/см}$. Предполагалось, что продукты, образующиеся при взрыве, будут выдавливаться через горлышко сосуда непосредственно в электрическое поле. Однако фактически было установле-

но, что они вообще не смогли выйти из сосуда, поскольку внешнее поле оказало сильное тормозящее действие на процесс газификации. При этом передний светящийся фронт волны не смог переместиться в верхнюю треть заряда, находившуюся во внешнем поле.

Проведенные эксперименты наглядно подтвердили предположение о возможном влиянии внешних электрических полей на процесс ударно-волнового разложения вспененного полистирола. Кроме того, полученные результаты явились свидетельством того, что процесс газификация ППС, распространяющийся в условиях предельно низких давлений, имеет электромагнитную природу.

Исследование химической активности продуктов ударно-волнового разложения пенополистирола. Вернемся к вопросу протекания реакций, поддерживаемых механизмом химиионизации. Интересным с точки зрения трактовки результатов, полученных при изучении взрывчатого разложения ППС, является тот факт, что небольшие добавки щелочных металлов (лития, натрия, калия) повышают степень ионизации углеводородных пламен; в них появляются значительные концентрации ионов этих металлов [8]. Введение небольших количеств углеводородов в водородно-воздушное пламя сильно повышает скорость ионизации присадок щелочных металлов. Установлено, что ответственным за образование этих ионов является термическое воздействие молекул C_nH_m , находящихся в долгоживущих возбужденных состояниях с энергией $\sim 4,6$ эВ при потенциалах ионизации щелочных металлов $4,3 \div 5,4$ эВ. Таким образом, увеличение яркости свечения в зоне газификации ППС при нанесении на гранулы раствора NaCl может быть связано с появлением ионов Na в присутствии возбужденных радикалов углеводородов, образовавшихся при ударно-волновом разложении ППС.

С целью определения химической активности продуктов газификации пенополистирола был проведен ряд экспериментов по схеме (рис. 5), но в отличие от предыдущих опытов в данной серии стеклянные сосуды, в которые помещались заряды, закрывались крышками из различных материалов – стали, алюминия, древесины, стекла. Было установлено, что интенсивное плазменное облако образовывалось

во всех случаях и зависало в воздухе на 160–200 мкс. В зависимости от материала крышек изменялись конфигурация облака и интенсивность его свечения (рис. 7), что свидетельствует о химическом взаимодействии продуктов разложения ППС с материалами, из которых изготовлены крышки. Более того, из экспериментов следует, что продукты газификации ППС обладают очень высокой химической активностью, поскольку переводят в плазменное состояние довольно плотные и достаточно инертные в химическом отношении вещества в течение очень короткого промежутка времени, измеряемого несколькими микросекундами.

При смачивании гранул ППС водным раствором аммиачной селитры химическая активность продуктов разложения таких гранул относительно металлов, стекла, полиэтилена и древесины исчезает – плазменные облака в этом случае не наблюдаются. Очевидно, что это связано с нейтрализацией их продуктами разложения аммиачной селитры.

Результаты, подтверждающие высокую химическую активность продуктов взрывного разложения ППС, получены при взрывании его в манометрической бомбе. В бомбу было помещено 30 г неразделенного по фракциям ППС насыпной плотностью $0,006$ г/см³ и общим объемом 5 л. В качестве боевика использовано 100 г аммонита 6ЖВ. При вскрытии бомбы после взрыва были обнаружены куски отвердевшего вещества черного цвета с вкраплениями самых мелких гранул диаметром не более 1 мм. На стенках бомбы – налет жирной тяжелой сажи. Общая масса твердых продуктов равнялась практически суммарной массе ППС и аммонита – около 130 г. Был сделан вывод, что куски твердого вещества образованы в результате химического взаимодействия продуктов разложения ППС и аммонита с последующей их полимеризацией в условиях сравнительно низких значений давления и температуры.

Таким образом, проведенные эксперименты убедительно свидетельствуют о высокой химической активности продуктов разложения ППС относительно различных веществ, что дает основание сделать вывод об активной роли ППС при детонации взрывчатых смесей различного состава и плотности.

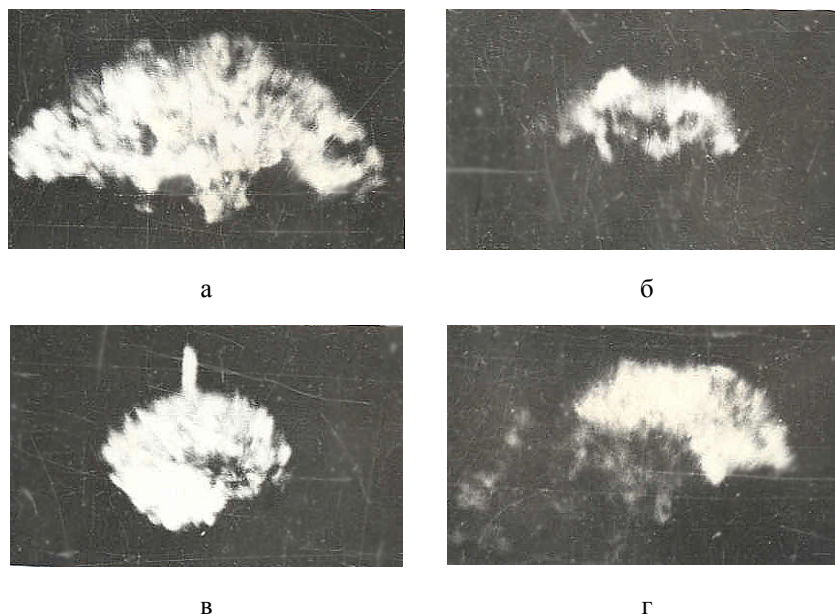


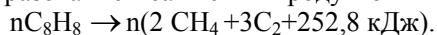
Рис. 7. Форма сгустков, образовавшихся в результате взаимодействия продуктов газификации пенополистирола с различными материалами: а – полиэтиленом; б – то же, при замене воздуха в гранулах и между гранулами в банке на кислород; в – сталью; г – алюминием.

Механизмы самоускорения процесса газификации пенополистирола в детонационной волне. В целом эксперименты по изучению свойств ППС как компонента взрывчатых смесей показали, что разложение сверхлегкого ППС при достаточно мощном инициирующем импульсе носит самоподдерживающийся, волновой характер. Одним из условий, при которых возможно протекание самоподдерживающегося процесса в заряде, является экзотермичность разложения вещества. Анализ литературы показал, что имеются сведения [6, 8], указывающие на то, что в полимерах, подобных полистиролу, процесс разложения в определенных условиях может проходить в две стадии:

1) экзотермического разложения полимера на мономер



2) экзотермической реакции карбонизации с образованием сажистых продуктов



Как видно из приведенных уравнений, количество тепла, выделяющегося при взрывчатом разложении ППС, значительно превышает затраты тепла на его разогрев и разложение до

первичных продуктов. Суммарный тепловой эффект газификации ППС равен 220 кДж/моль. Интересно отметить, что при взрывчатом разложении аммиачной селитры выделяется всего около 130 кДж / моль.

О значительном энерговыделении при взрывчатом разложении ППС свидетельствует наблюдавшийся экспериментально самоподдерживающийся процесс газификации ППС на участке трубы длиной около 1 м даже в том случае, когда гранулы его были смочены водным раствором хлористого натрия, по количеству составлявшим более 200% от массы ППС. Отсюда можно сделать вывод, что тепла, выделяющегося при газификации ППС, достаточно для того, чтобы обеспечить разогрев воды и соли, распределенных тонким слоем на поверхности его гранул. В свою очередь, введение воды и солей щелочных металлов в заряд позволяет увеличить давление в зоне химической реакции за счет испарения воды и повысить излучательную способность продуктов газификации за счет ионизации NaCl.

Отсюда следует, что в низкоплотных взрывчатых смесях, в которых невозможно

разложение гранул аммиачной селитры за счет ударного сжатия, роль ППС заключается в химическом воздействии на аммиачную селитру и переводе ее таким образом в химически активное, возбужденное состояние.

Анализ литературы показывает, что в условиях пониженного давления в зоне химической реакции низкоплотных ВВ разложение ППС и аммиачной селитры может носить самоускоряющийся характер [9]. Один из механизмов ускорения реакции – это *автокатализ*, который в системах больших размеров может привести к автокаталитическому взрыву. Как известно, катализатором называют вещество, значительно изменяющее скорость реакции, но остающееся после реакции в том же количестве, что и до нее. В автокаталитических реакциях катализатор является продуктом реакции, конечным или промежуточным. Огромные скорости в этом случае достигаются за счет все более и более увеличивающегося содержания катализатора по мере протекания реакции. Скорость реакции при этом проходит через максимум и начинает понижаться вследствие уменьшения количества исходного вещества, когда влияние этого уменьшения уже не компенсируется ростом концентрации катализатора. Если протекание автокаталитических реакций дополнительно сопровождается выделением тепла, то скорости перехода из одного состояния в другое становятся настолько большими, что происходит скачкообразная, катастрофическая перестройка системы или ее полное разрушение (взрыв).

Другой известный механизм – это *цепное* самоускорение реакции, принимающее в конце концов взрывоподобный характер. В этом случае, как и при автокатализе, перестройка системы идет крайне интенсивно, лавинообразно, очень быстро достигая состояния, когда переход на другой режим уже становится невозможным. Для цепных реакций характерно то, что они протекают через стадию образования активных частиц – свободных атомов, неустойчивых молекул или радикалов. Активные частицы вступают в реакции с исходными веществами, в результате чего снова возникают активные частицы. Таким образом, цепные ре-

акции – это совокупность последовательно протекающих реакций, в которой реагентами очередного развивающегося процесса служат продукты предыдущего процесса. Большая скорость цепных реакций объясняется высокой реакционной способностью активных частиц, вызывающих развитие цепной реакции.

И, наконец, еще один механизм, приводящий к резкому росту скорости реакций – это *тепловое* самоускорение (тепловой взрыв), которое происходит в результате повышения температуры реагирующего вещества за счет самой реакции, носящей экзотермический характер.

При взрыве бризантных ВВ зона химической реакции распространяется в виде ударного скачка, поэтому механизмы самоускорения в них не успевают проявиться. При детонации низкоплотных ВВ механизмы самоускорения играют первостепенную роль, поэтому при составлении взрывчатых смесей пониженной плотности особое внимание должно уделяться подбору компонентов, образующих при своем разложении вещества, способные к проявлению высокой химической активности.

Литература

1. Кук М.А. Наука о промышленных взрывчатых веществах. – М.: Недра, 1980.
2. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, испр. – В 2 т. – Т. 2. – М.: Физматлит, 2004.
3. Нифадьев В.И., Калинина Н.М. Низкоплотные и сверхнизкоплотные взрывчатые смеси. Механизм детонации. – Бишкек: Илим, 1998.
4. Носова Е.М., Житник А.С. и др. Производство литья методом газифицируемых моделей. Серия V. – М.: ВПКТИСтройдормаш, 1968.
5. Павлов В.А. Пенополистирол. – М.: Химия, 1975.
6. Асеева Р.М., Заиков Г.Е. Горение полимерных материалов. – М.: Наука, 1981.
7. Дементьев А.Г. и др. Структура и свойства пенопластов. – М.: Химия, 1983.
8. Щербаков Н.Д., Кабичев Г.И., Серов В.В. Механизм первичных реакций хемионизации в углеводородных пламенах // ФГВ. – 1989. – № 4.
9. Андреев Н.И., Беляев А.Ф. Теория взрывчатых веществ. – М.: Оборониздат, 1960.