

**К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ
ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ЗАЖИГАНИЯ
ТРУДНОВОСПЛАМЕНЯЕМЫХ БЕЗГАЗОВЫХ СИСТЕМ**

*А. Г. Струнина, В. И. Ермаков, С. В. Костин,
В. В. Барзыкин
(Черноголовка)*

В работах [1—7] теоретически и экспериментально исследованы процессы зажигания безгазовых систем тепловой волной горящего воспламенителя. Определены основные характеристики процесса зажигания (время, температура и энергия зажигания — t_z , T_z , Q_z) и следующего за ним процесса выхода поджигаемой системы на установившийся режим горения (время установления режима t_y , характер изменений нестационарной скорости горения в переходной области). Найдена связь основных характеристик процесса с параметрами обеих реагирующих систем (воспламенителя и поджигаемой системы), выяснено влияние на эти характеристики теплотеря в окружающую среду, а также проанализированы предельные режимы.

Ниже проведено обобщение полученных результатов с целью анализа путей подбора оптимальных условий организации процесса. Необходимо отметить, что требования к оптимизации не совпадают для различных технических задач. Так, например, при использовании безгазовых составов во вспомогательных системах ракетно-космической техники [8] необходимо определенное время срабатывания изделия и ограничение веса. Горение безгазовых составов в трассерах и при СВС-процессах должно характеризоваться малым переходным режимом. Иногда оказывается достаточным обеспечить надежное зажигание.

Для удовлетворения того или иного требования необходимо управлять характеристиками процесса. В связи с этим в работе анализируется связь основных характеристик процесса с параметрами воспламеняющей и поджигаемой систем с целью выяснения возможности их оптимизации.

Общая картина развития процесса. В условиях непосредственного контакта реагирующих безгазовых систем тепловая волна, идущая по воспламенителю к месту контакта, инициирует реакцию в поджигаемом составе. С некоторой задержкой (задержкой зажигания) после поступления от воспламенителя определенного количества тепла (энергии зажигания¹) в прогреваемых слоях поджигаемой системы формируется фронт горения, который начинает перемещаться по системе с нестационарной скоростью. Скорость нестационарного горения совершает колебания с затухающей амплитудой, приближаясь к своему стационарному значению.

Развитие процесса инициирования реакции безгазовой системы тепловой волной горящего воспламенителя определяется соотношением меж-

¹ Определение этих характеристик дано в [3].

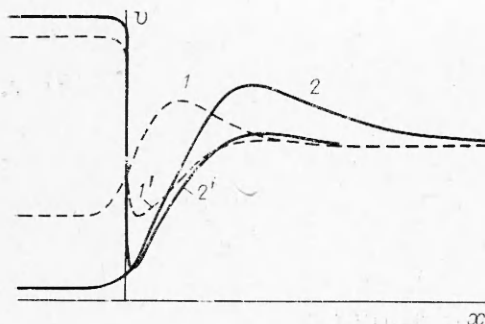


Рис. 1. Изменение нестационарной скорости горения.
1, 2 — $\Delta H_1 > \Delta H_2$; 1', 2' — $\Delta H_1 < \Delta H_2$.

ции $t' = a/v^2$ есть время сгорания прогретого слоя системы при стационарном горении. Параметр $\Delta H_1 t'_2 / \Delta H_2 t'_1$ отражает динамику поступления избыточного тепла воспламенителя в поджигаемую систему.

В большинстве из рассмотренных в [1—7] случаев для определения режима зажигания достаточно знать соотношение между избытками энтальпий воспламенителя и поджигаемой системы. При индукционных режимах зажигания ($\Delta H_1 > \Delta H_2$, цифры 1, 2 относятся соответственно к воспламенителю и поджигаемой системе) время зажигания превышает время выхода на установившийся режим горения. В режимах сжигания ($\Delta H_1 < \Delta H_2$) время зажигания мало по сравнению с временем установления стационарного горения поджигаемой системы. Характер изменения нестационарной скорости горения при разных режимах зажигания различен (рис. 1).

При индукционном режиме количество тепла, поступившего в поджигаемую систему к моменту формирования в ней фронта горения, превышает количество тепла, необходимое для стационарного распространения фронта горения (избыток энтальпии поджигаемой системы). Поэтому развитие процесса начинается с нарастания скорости и температуры горения выше стационарных значений. Выход на режим стационарного горения происходит после одного или нескольких колебаний скорости. В режиме сжигания поступившего от воспламенителя тепла оказывается недостаточно для стационарного горения. Перемещение фронта резко замедляется. Скорость горения снижается до значений, меньших чем у стационарного горения. Последующее горение сопровождается колебаниями скорости вплоть до выхода на установившийся режим.

Характеристика процесса зажигания. Исследование зависимости времени зажигания от избытков энтальпий обеих реагирующих систем показало, что с уменьшением избытка энтальпии воспламенителя и поджигаемой системы t_z снижается [1], но влияние избытка энтальпии воспламенителя значительнее². Результаты изучения чувствительности времени задержки зажигания к изменению теплофизических параметров реагирующих систем представлены в [4] в большом диапазоне изменения коэффициентов температуропроводности. Величина t_z существенно меняется лишь для случаев, когда поджигаемая система лучше проводит тепло, чем воспламенитель ($a_1/a_2 < 1$, $\Delta H_1/\Delta H_2 < 1$). Если лучший проводник тепла — воспламенитель ($a_1/a_2 > 1$, $\Delta H_1/\Delta H_2 > 1$), то время задержки зажигания остается почти постоянным при значительном (на два порядка) изменении соотношения a_1/a_2 .

² Избыток энтальпии системы снижается с ростом ее калорийности, поскольку скорость зависит от T экспоненциально (аррениусовский тип зависимости). Область $\Delta H_1/\Delta H_2 > 1$ соответствует индукционному режиму зажигания, область $\Delta H_1/\Delta H_2 < 1$ — режиму сгорания.

ду избытками энтальпий (ΔH) и временами релаксации реагирующих систем (t'). Избыток энтальпии $\Delta H = aQ/v$ [9] — в некотором смысле комплексная характеристика системы, зависящая от ее калорийности (Q — тепловой эффект реакции), теплофизических параметров (a — коэффициент температуропроводности), а также от условий теплообмена с окружающей средой (v — скорость горения, величина которой зависит наряду с другими параметрами и от уровня теплотерь). Время релаксации

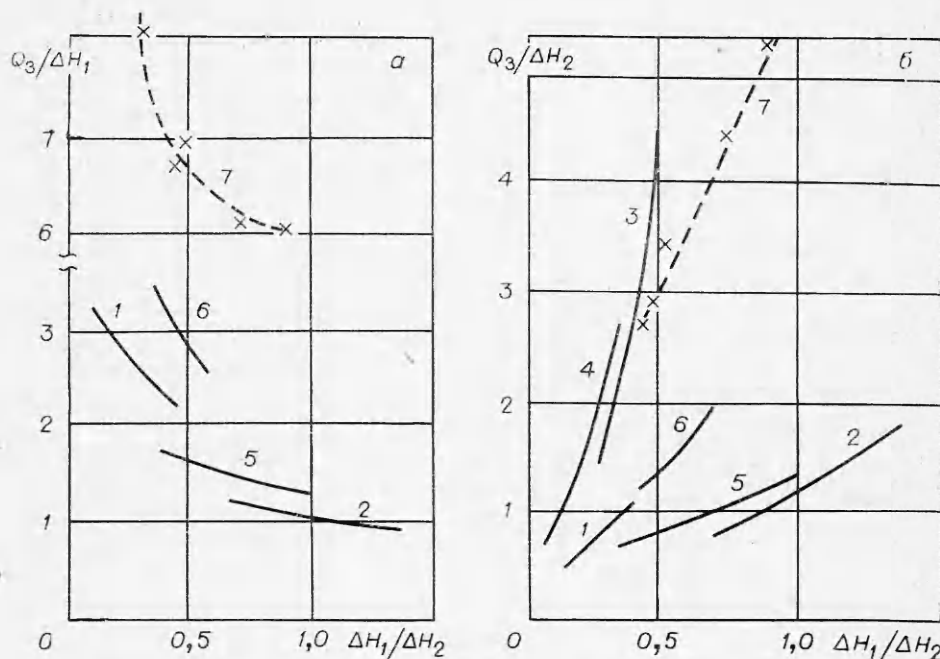


Рис. 2. Сравнение энергии зажигания с избытком энтальпии воспламенителя (а) и поджигаемой системы (б) при различных режимах зажигания.

1 — $E_1 = E_2 = 30$ ккал/моль, $Q_1 = Q_2 = 2$ ккал/см³, $0,3 \cdot 10^{-3} \leq a_1 \leq 1,33 \cdot 10^{-3}$, $0,85 \cdot 10^{-3} \leq a_2 \leq 2,5 \cdot 10^{-3}$ см²/с; 2 — $E_1 = E_2 = 30$ ккал/моль, $1,8 \leq Q_1 \leq 4$, $Q_2 = 2$ ккал/см³, $a_1 = a_2 = 1,33 \cdot 10^{-3}$ см²/с; 3 — $E_1 = E_2 = 30$ ккал/моль, $2 \leq Q_1 \leq 2,8$, $Q_2 = 2$ ккал/см³, $a_1 = 0,27 \cdot 10^{-3}$, $a_2 = 1,33 \cdot 10^{-3}$ см²/с; 4 — $E_1 = 30$, $E_2 = 50$ ккал/моль, $2,35 \leq Q_1 \leq 2,5$, $1,8 \leq Q_2 \leq 3$ ккал/см³, $a_1 = a_2 = 1,33 \cdot 10^{-3}$ см²/с; 5 — $E_1 = 20$, $E_2 = 30$ ккал/моль, $1,6 \leq Q_1 \leq 2$, $2 \leq Q_2 \leq 8$ ккал/см³; 6 — $E_1 = 20$, $E_2 = 30$ ккал/моль, $1,7 \leq Q_1 \leq 2$, $2 \leq Q_2 \leq 8$ ккал/см³; 7 — $6 \cdot 10^{-3} \leq \Delta H_1 \leq 1,5 \cdot 10^{-3}$, $4 \cdot 10^{-3} \leq \Delta H_2 \leq 1,8 \cdot 10^{-3}$ ккал/см².

Таким образом, быстро инициировать безгазовую систему волной горения можно воспламенителем с малым избытком энтальпии, причем желательно, чтобы $a_1 > a_2$ (воспламенитель у границы раздела с поджигаемой системой при этом сгорает с большими, чем стационарные, значениями скорости и температуры горения). Снижение времени зажигания, часто требуемое при оптимизации процесса, как показали расчеты по аналитическим выражениям [7], сопровождается снижением энергии зажигания и ростом температуры зажигания T_z , что не всегда желательно.

Представляет интерес провести сравнение энергии зажигания с избытками энтальпий обеих реагирующих систем. Чем меньше энергия зажигания по сравнению с избытком энтальпии воспламенителя, тем легче реализовать зажигание воспламенителем малой высоты. Чем меньше энергия зажигания по сравнению с избытком энтальпии поджигаемой системы, тем лучше организован процесс зажигания, так как при этом не только энергетические затраты малы, но и время зажигания снижается. Сравнение энергии зажигания с избытком энтальпий реагирующих систем в предельных режимах приведено на рис. 2. Предел по зажиганию, согласно [6], соответствует условиям резкого увеличения времени задержки зажигания. Энергия зажигания в условиях, предшествующих этим, считается предельной. Представленные на рис. 2 сплошные кривые получены численным счетом и отвечают предельным режимам зажигания различных систем. Анализ результатов счета проведен для случаев, когда воспламенитель и поджигаемая система различаются лишь теплофизическими параметрами (см. рис. 2, 1), калорийностью (2) либо калорий-

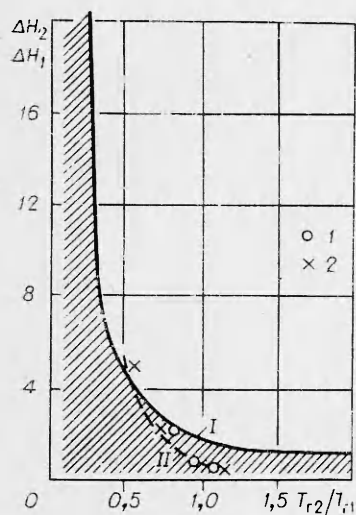


Рис. 3. Влияние соотношения калорийностей реагирующих систем на предельные режимы зажигания.

$I-E_1=20$, $15 \leq E_2 \leq 40$ ккал/моль, $Q_1=2$, $1,8 \leq Q_2 \leq 4,8$ ккал/см³, $a_1=a_2=1,33 \cdot 10^{-3}$ см²/с; $\Pi - 6 \cdot 10^{-3} \leq \Delta H_1 \leq 1,5 \cdot 10^{-3}$, $4 \cdot 10^{-3} \leq \Delta H_2 \leq 1,8 \cdot 10^{-3}$ ккал/см³. 1, 2 — железо-титановый и хромово-алюминиевый термит соответственно.

ностью и теплофизическими параметрами (3). Кривые 4—6 соответствуют случаям, когда все определяющие параметры различны, 7 — предельные энергии зажигания, полученные экспериментально. Опыты проводились по методике [2] на железо-титановом термите, поджигаемом хромово-циркониевым воспламенителем различной степени разбавления исходных компонентов продуктами реакции.

Анализ полученных результатов показывает, что предельная энергия зажигания при индукционном режиме ($\Delta H_1 > \Delta H_2$) может быть близка или меньше избытка энтальпии воспламенителя, а при режиме сжигания ($\Delta H_1 < \Delta H_2$) — значительно превышает его, а энергетические затраты на инициирование определенной поджигаемой системы больше, чем при режиме сжигания. Чем меньше температуропроводность воспламенителя по сравнению с температуропроводностью системы, тем сильнее зависит предельная энергия зажигания от отношения избытков энтальпий реагирующих систем.

Таким образом, надежно инициировать безгазовую систему воспламенителем малой высоты можно при условии, что его избыток энтальпии больше, чем у поджигаемой системы. Однако энергетически более выгоден режим сжигания, причем определенным образом подобранное соотношение теплофизических параметров (которое можно варьировать изменением плотности прессования составов) может существенно сократить энергетические затраты.

Область зажигания. Теоретическое и экспериментальное исследование предельных режимов [6, 7] позволяет проанализировать влияние различных параметров на ширину области зажигания (на рис. 3—5 заштрихована). Сплошные кривые разграничивают область параметров, где имеет место зажигание, от области параметров, в которой зажигание не реализуется. Здесь же нанесены (штриховые кривые) результаты экспериментов на модельных термитных системах с различной степенью разбавления исходных компонентов продуктами реакции.

Рис. 3 отвечает случаю, когда предел по зажиганию определенной поджигаемой системы достигается при снижении калорийности воспламенителя. Анализ полученной зависимости показывает, что с ростом калорийности обеих реагирующих систем область зажигания расширяется. Однако влияние калорийности воспламенителя на ширину области зажигания гораздо больше.

Изменение области зажигания с изменением соотношения тепловых активностей воспламенителя и поджигаемой системы представлено на рис. 4. Сплошная кривая — результат численного счета, штриховая проведена по экспериментальным данным. Необходимо отметить, что ширина области зажигания определяется не только отношением тепловых активностей реагирующих систем, но и в сильной степени их абсолютными значениями.

Результаты исследования предельных режимов, обусловленных тепловыми потерями из реагирующей системы в окружающую среду, обобщены на рис. 5. Вся область параметров делится на три подобласти: 1) поджи-

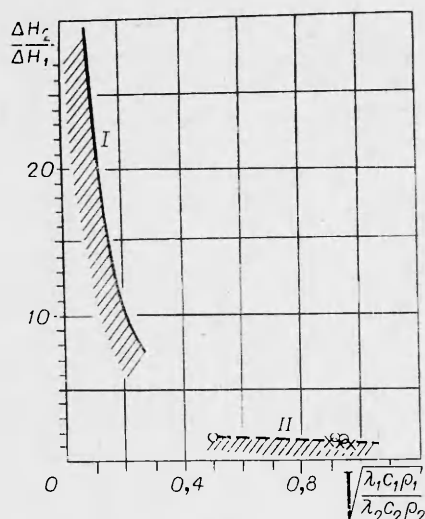


Рис. 4. Пределные режимы зажигания систем, различающихся коэффициентами тепловой активности (обозначения точек аналогичны рис. 3).

I — $E_1 = E_2 = 30$ ккал/моль, $Q_1 = Q_2 = 2$ ккал/см³, $0,88 \cdot 10^{-3} \leq a_1 \leq 1,33 \cdot 10^{-3}$, $1,26 \cdot 10^{-3} \leq a_2 \leq 1,42 \cdot 10^{-3}$ см²/с;
II — $18 \cdot 10^{-3} \leq \Delta H_{1,2} \leq 70 \cdot 10^{-3}$ ккал/см².

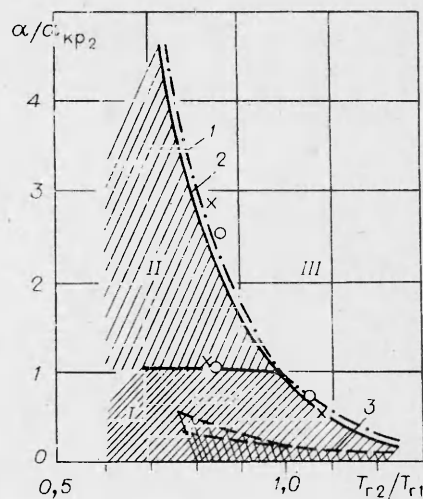


Рис. 5. Режимы горения при наличии теплопотерь; $E_1 = E_2 = 30$ ккал/моль, $1,4 \leq Q_1 \leq 2,8$, $Q_2 = 2$ ккал/см³ (обозначения точек аналогичны рис. 3)

1 — $a_1 = 13,3 \cdot 10^{-3}$, $a_2 = 1,33 \cdot 10^{-3}$ см²/с;
2 — $a_1 = a_2 = 1,33 \cdot 10^{-3}$; 3 — $a_1 = 0,27 \cdot 10^{-3}$, $a_2 = 1,33 \cdot 10^{-3}$.

гаемая система зажигается и выходит затем на установившийся режим горения; II) имеет место вынужденный режим сжигания системы при большом теплоотводе от воспламенителя; III) зажигание системы не реализуется.

Как показано [4], в обоих режимах зажигания предел по зажиганию системы ограничен пределом по горению воспламенителя. Соотношение между тепловыми активностями воспламенителя и поджигаемой системы меняет и соотношение между областями I—III. Так, если температуропроводность воспламенителя больше температуропроводности поджигаемой системы ($a_1 > a_2$), имеет место незначительное расширение областей I, II. Если температуропроводность системы больше, то значительно расширяется область III, где зажигание не реализуется. При этом предел по зажиганию может оказаться меньше предела по горению и система, способная гореть в данных условиях, не инициируется. Экспериментальные результаты, показанные на рис. 5, получены при обдуве азотом прессованных образцов термитов различной степени разбавленных исходных компонентов продуктами реакции.

Теоретическое и экспериментальное исследование выявило различные пути расширения области зажигания. Даже при фиксированных составах реагирующих систем область зажигания может быть расширена снижением теплопотерь в окружающую среду, уменьшением плотности прессования поджигаемой системы ρ_c и увеличением плотности прессования воспламенителя ρ_a . Изменение плотности прессования системы, как отмечено раньше, меняет и ее теплофизические параметры. При уменьшении ρ_c и увеличении ρ_a отношение температуропроводности воспламенителя к температуропроводности поджигаемой системы возрастает. Вследствие этого нарастает тепловая волна воспламенителя при подходе к поджигаемой системе и инициируется реакция более мощным тепловым потоком.

Применение прокладок на границе раздела между системами также способствует расширению области зажигания. Прокладки могут быть и с меньшей, чем у воспламенителя, температуропроводностью (типа беззольных фильтров), и с большей температуропроводностью (металлическая фольга). Механизм действия прокладок с плохой теплопроводностью аналогичен предыдущему, а металлическая фольга, имеющая низкую температуру плавления, при расплаве может улучшить тепловой контакт с воспламенителем и поджигаемой системой.

Характеристика переходного режима горения. Как отмечено раньше, основными характеристиками процесса в переходном к стационарному режиму горения является время выхода на режим t_v и характер колебаний (амплитуда, частота) нестационарной скорости горения. Время t_v с уменьшением избытка энтальпий обеих реагирующих систем при любом режиме зажигания снижается³ [1]. Так же, как и время задержки зажигания, величина t_v чувствительна к изменению теплофизических параметров реагирующих систем, если поджигаемая система лучше проводит тепло, чем воспламенитель [4].

Сравнение особенностей развития процесса горения в обоих режимах зажигания показывает, что при одинаковом отношении избытков энтальпий реагирующих систем амплитуда и частота колебаний нестационарной скорости горения относительно стационарного значения в индукционном режиме зажигания меньше, чем в режиме сжигания; выход на установившийся режим горения при индукционном режиме зажигания дольше (толщина прогретого слоя к моменту формирования фронта горения при этом больше, чем в режиме сжигания). Можно сказать, что индукционный режим зажигания по сравнению с режимом сжигания обеспечивает более «мягкий», но и более длительный нестационарный переходный процесс. Поэтому индукционный режим зажигания предпочтительнее для случаев, когда в течение всего времени горения заряда необходимо обеспечить минимальные колебания температуры и скорости.

В безгазовых составах из-за наличия раскаленных шлаков влияние воспламенителя на характер горения поджигаемой системы очень значительно. Если избыток энтальпии воспламенителя существенно отличается от избытка энтальпии поджигаемой системы, то при большой температуропроводности поджигаемой системы фронт горения формируется на значительном расстоянии от границы раздела (3—6 мм для термитных составов [6]) и начинает перемещаться сразу в обе стороны (к границе раздела и от нее); в режиме сжигания поджигаемый состав, способный к горению с постоянной скоростью, будет длительное время гореть с периодическими всплесками и депрессиями. В связи с этим увеличивать калорийность воспламенителя по сравнению с калорийностью поджигаемой системы (с целью минимизации временных и энергетических характеристик процесса) можно лишь в разумных пределах, чтобы не исказить процесс горения самой поджигаемой системы.

В заключение отметим, что проведенный выше анализ позволяет так варьировать параметры процесса, чтобы изменить его характеристики в нужную сторону.

Поступила в редакцию
18/III 1980

³ Нарастание t_v с уменьшением ΔH_1 в режиме сжигания при $\Delta H_1 \sim \Delta H_2$ имеет место лишь для случая, когда равенство избытков энтальпий означает равенство всех параметров реагирующих систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Струнина, В. Т. Мартемьянова и др. ФГВ, 1974, 10, 4.
2. В. И. Ермаков, А. Г. Струнина, В. В. Барзыкин. ФГВ, 1976, 12, 2.
3. А. Г. Струнина, Н. И. Ваганова, В. В. Барзыкин. ФГВ, 1977, 13, 6.
4. А. Г. Струнина, В. И. Ермаков, В. В. Барзыкин. ФГВ, 1978, 14, 4.
5. В. И. Ермаков, А. Г. Струнина, В. В. Барзыкин. ФГВ, 1978, 14, 6.
6. А. Г. Струнина, В. И. Ермаков, Э. А. Аверсон. ФГВ, 1979, 15, 4.
7. С. В. Костиц, А. Г. Струнина. ФГВ, 1979, 15, 5.
8. Вспомогательные системы ракетно-космической техники. М.: Мнр, 1970.
9. К. Г. Шкадинский, Б. И. Хайкин, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1974, 7, 1.

МОДЕЛЬ АГЛОМЕРАЦИИ АЛЮМИНИЯ ПРИ ГОРЕНИИ СМЕСЕВЫХ КОМПОЗИЦИЙ

В. Г. Григорьев, К. П. Куценогий, В. Е. Зарко

(Новосибирск)

Отличительная особенность горения гетерогенных металлсодержащих составов — агломерация, т. е. укрупнение за счет слияния частиц металла при прохождении волны горения через конденсированное вещество, в результате чего поверхность горения покидают частицы с размерами, намного превышающими исходные частицы металла [1, 2]. Несмотря на то, что изучению агломерации посвящено значительное число работ, в настоящее время практически отсутствует экспериментально обоснованный механизм агломерации алюминия при горении смесевых составов на основе перхлората аммония [2].

В работе [3] на основе анализа экспериментальных данных предложено механизм агломерации алюминия при горении таких смесей, который предполагает слияние частиц металла в пределах ячеек между зернами окислителя, в результате чего образуются агломераты с размерами, определяемыми величиной ячеек и содержанием в них алюминия. Ранее предположение о возможности образования агломератов путем накопления частиц металла в замкнутых «карманах» (pockets) между частицами окислителя высказано в работе [4], однако никаких количественных данных по размерам агломератов в ней не приведено. В литературе отсутствуют систематические количественные данные о влиянии структуры упаковки дисперсных компонентов в композиции на размер образующихся при ее горении агломератов. Эти обстоятельства явились причиной постановки задачи экспериментального исследования агломерации алюминия при вариации дисперсности и содержания компонентов в смеси [3] и давления среды [5]. Цель данной работы — дать теоретическое обоснование полученных экспериментальных закономерностей агломерации на основании статистического рассмотрения упаковки дисперсных компонентов в смесевой композиции.

При изучении плоских срезов (шлифов) установлено [5], что при относительно невысоком объемном содержании окислителя смесевая композиция может быть рассмотрена как разупорядоченная упаковка, состоящая из твердых частиц (окислителя и металла) и непрерывного связующего. Поскольку частицы перхлората аммония (ПХА) намного превышают в размерах частицы алюминия, в промежутках между зернами окислителя образуются скопления частиц металла, диспергированных случайным образом в связующем и контактирующих между собой. Для рассмотренных в [5] составов (табл. 1) ячейки со «скоплениями» металла имеют в основном замкнутый (ограниченный частицами ПХА) вид. На