

**О ВЛИЯНИИ ДИАМЕТРА ЗАРЯДА
НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ**

В. Э. Анников, Б. Н. Кондриков
(Москва)

Из теории горения газов следует [1, 2], что при уменьшении диаметра трубки скорость горения в результате относительного увеличения теплопотерь прогрессивно снижается, в пределе — при критическом диаметре — до значения в $\sqrt{e} \approx 1,65$ раз меньшего, чем скорость горения в адиабатических условиях.

Зависимость скорости горения конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) от диаметра заряда определялась К. К. Андреевым [3]. Для нитрогликоля и тетрила, горевших в стеклянных трубках на воздухе, вплоть до критического диаметра (около 0,2 и 1 см соответственно) сколько-нибудь определенного изменения скорости горения с диаметром не наблюдалось¹.

В связи с этим в настоящей работе изучалась зависимость скорости горения нескольких конденсированных ВВ от диаметра заряда². Опыты проводились при атмосферном давлении с метилнитратом, нитрогликолем, гексогеном и октогеном. Метилнитрат получали по обычной лабораторной методике [5] и перегоняли под атмосферным давлением при 65°. Нитрогликоль был получен этерификацией перегнанного под вакуумом этиленгликоля серноазотной смесью [5] с последующей перегонкой динитрата в вакууме (~ 3 мм рт. ст., при $\sim 70^\circ$). Остальные ВВ — заводского изготовления.

ВВ помещали в цилиндрические трубки из кварцевого или, реже, молибденового стекла, погружавшиеся в воду для уменьшения прогрева ВВ теплом, распространяющимся по стенке трубки впереди фронта горения. Если при этом конденсирующиеся на холодных стенках трубки капли влаги, стекая по стенкам, приводили к прекращению горения, уровень охлаждающей жидкости при горении понижали так, чтобы он все время был на 0,5—1 см выше поверхности горящего ВВ. В этом случае вода на стенках не накапливалась. Специальными опытами было установлено, что критический диаметр и скорость горения при таком изменении условий не менялись. Воспламенение осуществлялось накаливаемой электрическим током нихромовой проволокой, свернутой в виде плоской спирали. Скорость горения определялась с помощью секундомера. В ряде опытов производилась съемка горения кинокамерой «Пентафлекс». Критический диаметр горения определяли в конических трубках, из кварцевого стекла с углом при вершине около 5° и стенками толщиной 1 мм.

¹ Недавно [4] было получено уменьшение скорости горения конденсированного вещества при уменьшении диаметра трубки, в которой оно горело. Однако этим веществом был термит, не являющийся ВВ.

² В проведении опытов принимали участие студенты О. В. Федосеева, В. П. Шамшин.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

Метилнитрат. При температуре охлаждающей воды 20° горение метилнитрата в стеклянных капиллярах длиной 3 см со стенками толщиной $0,1\text{--}0,2\text{ мм}$ устойчиво распространялось, если внутренний диаметр d капилляра был больше $0,75\text{ мм}$ ¹. При $0,75\text{ мм}$ в двух опытах горение затухло, в третьем прошло до конца со скоростью $0,091\text{ г/см}^2\cdot\text{сек}$ (плотность $\rho=1,21\text{ г/см}^3$). При диаметре капилляра $0,77\text{ мм}$ во всех трех опытах горение было устойчивым, средняя скорость его $0,106\pm\pm 0,004\text{ г/см}^2\cdot\text{сек}$. При дальнейшем увеличении диаметра скорость возрастала (рис. 1) и в трубках диаметром $3\text{--}5\text{ мм}$ (толщина стенок — $0,5\text{--}1\text{ мм}$) достигла значения $0,137\pm 0,001\text{ г/см}^2\cdot\text{сек}$ (средняя величина и средняя погрешность по четырем опытам). Эта величина хорошо согласуется с полученной К. К. Андреевым и М. М. Пуркалном [6] в стеклянных трубках диаметром $3,8\text{ мм}$ на воздухе — $0,139\text{ г/см}^2\cdot\text{сек}$.

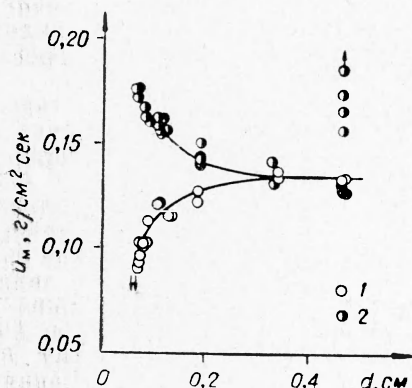


Рис. 1. Зависимость скорости горения метилнитрата от диаметра стеклянной трубки.

1 — трубка погружена в воду; 2 — трубка на воздухе (стрелка вниз — затухание горения, стрелка вверх — вспышка).

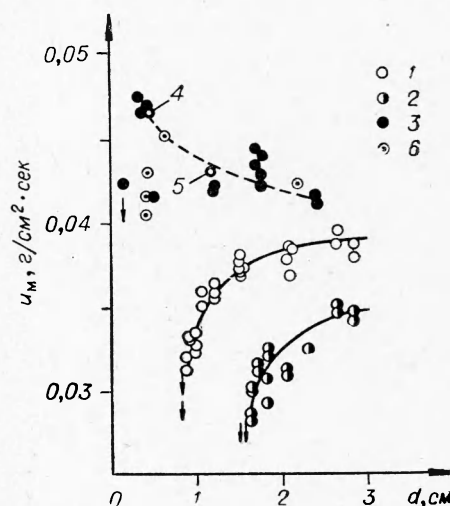


Рис. 2. Зависимость скорости горения нитрогликоля от диаметра трубки.

1, 2 — трубка в воде, начальная температура: 1 — 40° , 2 — 20° ; 3—6 — трубка на воздухе, начальная температура 20° , по данным: 3 — [3], 4 — [8], 5 — [9] 6 — наши опыты.

В стеклянных трубках на воздухе зависимость скорости горения от диаметра была иной: при увеличении диаметра (в этом случае затухания даже при $d=0,63\text{ мм}$ не происходило) скорость падала, при $4\text{--}5\text{ мм}$ практически совпадая со скоростью горения в трубках, погруженных в воду. При $d=5\text{ мм}$ горение на воздухе было неустойчивым: в одном опыте (на рис. 1 — точка со стрелкой, направленной вверх) произошла вспышка с выбросом капель горячей жидкости, в трех других скорость была заметно выше обычной.

Нитрогликоль. Критический диаметр горения ($d_{кр}$) нитрогликоля ранее был определен Г. Н. Беспаловым [7]. При 20° в конических стеклянных трубках, погруженных в воду, он составлял 13 мм , при 40° — 8 мм . Наши опыты проводились в конических кварцевых трубках, также

¹ Далее во всех случаях указывается внутренний диаметр трубки.

погруженных в воду. При 40 и особенно при 20° наблюдался сильный разброс результатов. При 20° (16 опытов) $d_{кр} = 14,8 \pm 2,3$ мм, при 40° (10 опытов) $d_{кр} = 9,3 \pm 1,2$ мм. Горение было спокойным, беззвучным, поверхность мениска жидкости гладкая, желтое свечение в виде диска над поверхностью жидкости было ярче при большом диаметре и заметно тускло (толщина диска при этом уменьшалась) при приближении к критическому диаметру. В части опытов на стенках трубки наблюдали тонкий слой жидкости, поднимающийся над поверхностью нитрогликоля до высоты 3—5 мм.

Результаты опытов по определению влияния диаметра на скорость горения нитрогликоля представлены на рис. 2. Скорость горения, так же, как в случае метилнитрата, существенно растет при увеличении диаметра. Скорость горения в адиабатических условиях ($u_{ад}$) при 40° по этим данным составляет 0,039—0,040 г/см²·сек ($\rho = 1,49$ г/см³). При 20° значение $u_{ад}$ установить не удалось (в лабораторных условиях трудно работать с зарядами диаметром более 2—3 см), однако видно, что эта величина ниже, чем полученная в ряде работ [3, 8, 9] скорость горения нитрогликоля при 20° в трубках, находящихся на воздухе.

Гексоген и октоген. Результаты опытов с порошкообразным гексогеном (средний размер частиц 0,06 мм), подпрессованным от руки в трубки из кварцевого стекла длиной 6 см со стенками толщиной 1—1,5 мм (плотность заряда 1,0—1,4 г/см³), приведены на рис. 3. Ни-

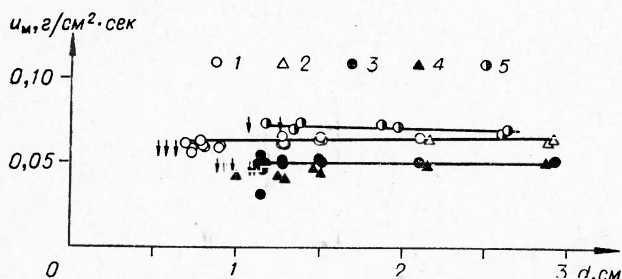


Рис. 3. Зависимость скорости горения гексогена (1—4) и октогена (5) от диаметра заряда в трубках из кварцевого стекла.

1, 2 — на воздухе; 3—5 — в воде. Плотность заряда: 1 и 3 — 1,3—1,4; 2 и 4 — 1—1,2; 5 — 1,2—1,3 г/см³.

какого хоть сколько-нибудь определенного влияния диаметра на скорость горения зарядов как находящихся на воздухе, так и погруженных в воду не наблюдается. Средняя скорость горения на воздухе по всем опытам $0,060 \pm 0,002$ г/см²·сек, в воде — $0,049 \pm 0,003$ г/см²·сек. Критический диаметр по этим данным на воздухе 7 мм, в воде — 11 мм. Опыты с гексо-

геном, помещенным в конические трубки, дали критический диаметр горения на воздухе ~ 2 мм, в воде — 12,2 и 12,4 мм ($\rho = 1,3$ г/см³).

Не получено изменения скорости горения (трубки погружены в воду) при увеличении диаметра и в случае октогена (см. рис. 3). Критический диаметр горения октогена в конических трубках (размер частиц 0,07 мм, $\rho = 1,1—1,2$ г/см³) 14,1 и 14,2 мм. Скорость горения на воздухе также в двух опытах при диаметре 15 мм 0,076 и 0,079 г/см²·сек.

Интересно отметить, что при горении гексогена (и октогена) в кварцевых трубках, погруженных в воду, подробно изучавшегося ранее [10], слоя пены на поверхности конденсированной фазы не наблюдается. Нег этого слоя и при горении гексогена в плексигласовых трубках на воздухе. Небольшой поясок пены у стенок стеклянной трубки появляется в том случае, если трубка находится на воздухе и, очевидно, связан с прогревом вещества теплом, распространяющимся по стенке трубки.

При непосредственном наблюдении и киносъемке камерой «Пентафлекс» на 16-миллиметровую киноплёнку сверху, с торца заряда, оказалось, что на поверхности порошка имеется тонкий слой жидкости, нахо-

дящийся в непрерывном движении (по-видимому, под действием сил поверхностного натяжения). Небольшие пузырьки, ежесекундно возникающие в этом слое, быстро (со скоростью до 10—20 см/сек) увеличиваются в диаметре, обнажая сухую поверхность порошкообразного ВВ и быстро сменяясь другими¹. При горении октогена жидкость иногда собиралась в капли диаметром 1—2 мм, перемещавшиеся по поверхности порошка и остававшиеся в виде твердых комочков после затухания ВВ (в опытах с коническими зарядами). Горение гексогена и октогена в отличие от горения двух предыдущих ВВ сопровождается сильным неравномерным шипением и иногда заметно пульсирует. Сходная картина наблюдается и при горении тетрила.

Тетрил. Опыты показали (рис. 4), что при горении порошкообразного тетрила (средний размер частиц 0,04 мм, плотность заряда 1,0—1,1 г/см³) в кварцевых трубках, погруженных в воду, скорость горения, так же как в случае гексогена и октогена, почти не зависит от диаметра. Для сравнения на

рис. 4 приведены результаты опытов К. К. Андреева [3] в стеклянных трубках на воздухе. Плотность зарядов в этих опытах несколько ниже (0,84—0,88 г/см³), чем в наших, и средняя скорость горения немного меньше. Скорость горения тетрила при атмосферном давлении (в отличие от гексогена) заметно уменьшается при уменьшении плотности заряда [8] и слабо зависит от охлаждения стенок трубки водой. Точки при плотности 1,1 г/см³ на воздухе (см. рис. 4) близки к точкам, полученным при данной плотности в опытах с трубками, погруженными в воду, а точки при плотности 0,8—0,9 г/см³ в воде близки к полученным при данной плотности на воздухе.

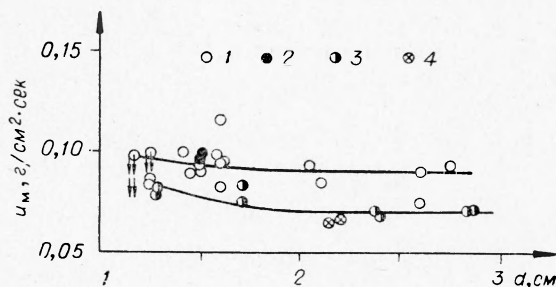


Рис. 4. Зависимость скорости горения тетрила от диаметра трубки.

1 и 4 — в воде; 2 — на воздухе; 3 — по данным [3]. Плотность заряда: 1 и 2—1,0—1,1; 3 и 4—0,8—0,9 г/см³.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты опытов показывают, что у легколетучих взрывчатых жидкостей — метилнитрата и нитрогликоля — обнаруживается зависимость скорости горения от диаметра, сходная с полученной теоретически Я. Б. Зельдовичем [1, 2] для газов. При уменьшении диаметра трубки скорость горения этих веществ, в том случае если трубка погружена в воду, прогрессивно падает. Скорость на пределе для метилнитрата в 1,5 раза меньше адиабатической, для нитрогликоля (при 40°) она меньше в 1,25 раза.

Если горение происходит в стеклянной трубке, находящейся на воздухе, скорость его при уменьшении диаметра не падает, а растет, очевидно, в результате усиливающегося по мере уменьшения диаметра прогрева ВВ теплом, распространяющимся по стенке трубки². Лишь в

¹ Аналогичная картина наблюдалась и при горении тэна (обычно быстро затухавшем после поджигания).

² В конических трубках на воздухе этот прогрев может быть так велик, что в некоторых опытах нитрогликоль в нижней части трубки при подходе к ней фронта горения закипает.

очень узких трубках, судя по приведенным на рис. 2 данным [3], наблюдается некоторая тенденция к снижению скорости.

Подробнее количественное сопоставление теории с опытом для метилнитрата и нитрогликоля в зарядах, охлаждаемых водой, может быть осуществлено следующим образом. Если предположить, что при горении определяющую роль играют потери тепла от нагретого газа, можно, следуя Я. Б. Зельдовичу [1, 2], записать уравнение баланса тепла при горении в виде

$$uc \frac{\pi d^2}{4} (T_{ад} - T_r) = \alpha S \frac{T_r - T_0}{2}, \quad (1)$$

где u — массовая скорость горения ВВ; c — теплоемкость газа; d — диаметр заряда; $T_{ад}$ — температура горения при адиабатических условиях (при $d \rightarrow \infty$); T_r — температура горения при данном d ; α — коэффициент теплоотдачи; S — поверхность теплообмена, влияющая на скорость горения; T_0 — температура окружающей среды.

В левой части уравнения (1) фигурирует количество тепла, ежесекундно теряемое горячим газом вблизи от зоны максимальной температуры, в правой части — количество тепла, передаваемое через стенку трубки.

Согласно [2], $S = 2\pi d \delta$, где δ — толщина прогретого слоя при стационарном горении: $\delta = \frac{\kappa}{u_n} = \frac{\lambda}{cu}$ κ — температуропроводность, λ — теплопроводность, u_n — нормальная скорость горения газа).

Введя безразмерную разность температур $\theta = \frac{E}{RT_{ад}^2} (T_{ад} - T_r)$

и диаметр $D = \frac{du_{ад} c T_{ад}}{2\lambda} \sqrt{\frac{R}{E Nu (T_r - T_0)}}$, где $Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$ критерий Нуссельта, представим уравнение (1) в виде

$$D^2 \theta = e^\theta. \quad (2)$$

Как известно [1, 2], в критических условиях из (2) получается

$$\theta_{кр} = 1, \quad D_{кр} = \sqrt{e}. \quad (3)$$

С учетом (3) представим уравнение (2) в виде

$$\left(\frac{D}{D_{кр}}\right)^2 e^\theta = e^\theta. \quad (4)$$

Согласно теории горения [2],

$$\frac{u_{ад}}{u} = e^{\theta/2}, \quad \text{или} \quad 2 \ln \frac{u_{ад}}{u} = \theta. \quad (5)$$

Комбинируя (4) и (5) и принимая во внимание, что $\frac{D}{D_{кр}} \approx \frac{d}{d_{кр}}$, получим

$$\ln \frac{u_{ад}}{u} = \frac{1}{2e} \left(\frac{u_{ад} d_{кр}}{ud}\right)^2. \quad (6)$$

Из соотношения (6) следует, что в координатах $x = \left(\frac{u_{ад} d_{кр}}{ud}\right)^2$; $y = \lg \frac{u_{ад}}{u}$ (логарифм десятичный) зависимость $u(d)$ должна иметь

вид прямой, проходящей через начало координат, с тангенсом угла наклона к оси абсцисс $k = \frac{1}{4,606} = 0,0802$.

Результаты опытов с метилнитратом при 20° и нитрогликолем при 40° приведены в координатах $x-y$ на рис. 5 и 6. Принято для метилнитрата: $u_{ад} = 0,137 \text{ г/см}^2 \cdot \text{сек}$, $d_{кр} = 0,75 \text{ мм}$; для нитрогликоля: $u_{ад} = 0,0395 \text{ г/см}^2 \cdot \text{сек}$, $d_{кр} = 9 \text{ мм}$.

Из рис. 5 видно, что точки для метилнитрата (за небольшим исключением) хорошо укладываются на прямую с тангенсом угла наклона 0,080.

Разброс результатов для нитрогликоля при 40° несколько больше, но и в этом случае через экспериментальные точки может быть проведена прямая. Наклон ее к оси абсцисс характеризуется величиной $k=0,073$. Таким образом, и в случае нитрогликоля теория удовлетворительно согласуется с опытом¹.

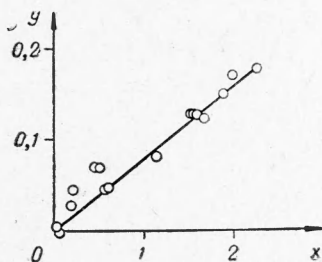


Рис. 5. Данные рис. 1 (кривая 1) для метилнитрата в координатах:

$$x = \left(\frac{u_{ад} d_{кр}}{ud} \right)^2; \quad y = \lg \frac{u_{ад}}{u}$$

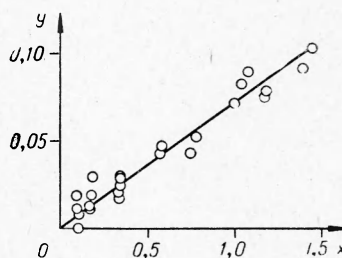


Рис. 6. Данные рис. 2 (кривая 1) для нитрогликоля при 40° в координатах:

$$x = \left(\frac{u_{ад} d_{кр}}{ud} \right)^2; \quad y = \lg \frac{u_{ад}}{u}$$

В случае порошкообразных плавящихся ВВ — гексогена, октогена и тетрила — теория не согласуется с опытом даже качественно: скорость горения этих веществ от диаметра практически не зависит.

Возможная причина этого заключается в особенностях поведения слоя жидкости, находящегося на поверхности порошка. Выше отмечалось, что этот слой находится в постоянном неравномерном движении, причем отдельные участки слоя могут перемещаться со значительной скоростью. Турбулизация горения, обусловленная движением слоя жидкости, может приводить к резкому охлаждению и затуханию задолго до достижения обычного критического диаметра². Независимость скорости горения от диаметра заряда будет получена, если диаметр, при котором горение затухает в результате турбулизации, в 2—3 раза больше $d_{кр}$. В случае тетрила к этому может добавиться также неравномерность горения за счет образования в поверхностном слое продуктов распада и вспенивания жидкости в результате идущей в конденсированной фазе экзотермической реакции [12].

¹ Учет неустойчивости горения конденсированных ВВ по Я. Б. Зельдовичу [11] несколько уменьшает требуемую теорией величину k . В этом случае для метилнитрата теория дает $k=0,075$, для нитрогликоля — 0,040. Отношение $u_{ад}/u_{кр}$ при этом уменьшается. Подробнее этот вопрос будет рассмотрен особо.

² На существование такой турбулентности указывает и отмеченный выше сильный шум — резкое неравномерное шипение, — сопровождающий горение гексогена, октогена и тетрила.

При уменьшении плотности заряда уменьшается сцепление между частицами порошка, и движение пленки жидкости по поверхности интенсифицируется. Возможно, с этим связан известный эффект уменьшения способности к горению плавящихся ВВ при снижении плотности [8].

Если высказанное здесь предположение справедливо, загрузка жидкости, например, введением неплавящегося тонкодисперсного порошка должно привести к уменьшению критического диаметра горения и одновременно к появлению зависимости скорости горения от диаметра. Действительно, введение в гексоген 5% сажи¹ привело к уменьшению критического диаметра почти вдвое — от 12,3 до 6,7 мм. При увеличении диаметра сверх критического скорость горения росла, увеличившись от 0,04 г/см²·сек при диаметре 7 мм до 0,05 при 12 мм.

Следует отметить, что влияние порошкообразных примесей, вообще говоря, является более сложным. Из исследованных порошков тонкого измельчения (средний размер частиц 5—10 мк, содержание добавки в смеси 5%), кроме сажи, сильно уменьшили критический диаметр горения гексогена также SiO₂ ($d_{кр} = 6$ мм), Cu (6 мм), K₂Cr₂O₇ (7 мм). Алюминиевая пудра ПАК-4, Al₂O₃, Cr₂O₃, PbO и графит на величину критического диаметра влияли слабее (он уменьшился до 9—10 мм). Причины различия во влиянии этих добавок пока неясны.

Рассматривалась также возможность устранения влияния слоя расплава, заключающаяся в применении неплавящегося ВВ — пироксилина. К сожалению, для зарядов, помещенных в стеклянные трубки ($\rho = 0,5—0,7$ г/см³), не удалось получить достаточно равномерной по длине плотности, и скорость горения сильно менялась от опыта к опыту. При $d = 0,6—1$ см (23 опыта) средняя скорость горения 0,18 г/см²·сек, при 1,5—2 см (6 опытов) — 0,21 г/см²·сек.

ВЫВОДЫ

Зависимость скорости горения метилнитрата при 20° и нитрогликоля при 40° от диаметра трубки в условиях, когда передачей тепла при горении по стенкам трубки непрореагировавшему веществу можно пренебречь (жидкость горит в тонкостенной стеклянной трубке, погруженной в воду), с удовлетворительной точностью подчиняется соотношениям теории горения газов Я. Б. Зельдовича. Отношение адиабатической скорости горения к критической ($u_{ад}/u_{кр}$) близко к значению, предсказанному теорией для метилнитрата (1,50) и заметно меньше для нитрогликоля (1,25). Одна из возможных причин этого — неустойчивость горения, связанная с тепловой инерционностью прогретого слоя [11].

Скорость горения метилнитрата и нитрогликоля в узких стеклянных трубках, находящихся на воздухе, за счет передачи тепла по стенке может быть значительно выше адиабатической скорости горения. Величина 0,045 г/см²·сек, обычно принимаемая за скорость горения нитрогликоля при атмосферном давлении и комнатной температуре [8, 9], выше $u_{ад}$ в 1,2—1,3 раза.

В случае порошкообразных плавящихся ВВ — гексогена, октогена и тетрила — существенного влияния диаметра заряда на скорость го-

¹ Сажа «Lihilblack a», поверхность 100 м²/г, содержание золы 0,68%, содержание влаги 1,7%, рН=7,45.

² Очевидно, в результате накопления в слое расплава при горении относительно более устойчивых добавок, содержание их в прогретом слое значительно больше, чем в исходной смеси.

рения не обнаружено. Высказано предположение, что основная причина этого заключается в турбулизации горения, обусловленной интенсивным движением по поверхности порошка слоя расплава под действием сил поверхностного натяжения.

*Поступила в редакцию
2/X 1967*

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1941, **11**, 159.
2. Я. Б. Зельдович, В. В. Воеводский. Тепловой взрыв и распространение пламени в газах. ММИ, 1947.
3. К. К. Андреев. Докл. АН СССР, 1935, **1**, № 4, 220.
4. Э. И. Максимов (Дисс.). Филиал ИХФ АН СССР, 1966.
5. Ф. Наум. Нитроглицерин и нитроглицериновые взрывчатые вещества. М.—Л., Хим.-тех. изд-во, 1934.
6. К. К. Андреев, М. М. Пуркалн. Докл. АН СССР, 1945, **50**, 281.
7. К. К. Андреев, Г. Н. Беспалов. Сб. «Теория взрывчатых веществ». М., Оборонгиз, 1963.
8. К. К. Андреев. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ. М.—Л., Госэнергоиздат, 1957.
9. А. Ф. Беляев. ЖФХ, 1940, **14**, 1009.
10. Э. И. Максимов, А. Г. Мержанов, Ю. Р. Колесов. Докл. АН СССР, 1965, **162**, № 5, 1115.
11. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1942, **12**, вып. 11—12, 498.
12. А. Д. Марголин, А. Е. Фогельзанг. ФГВ, 1966, № 2, 10.