

О НИЗКОСКОРОСТНОЙ ДЕТОНАЦИИ ЗЕРНЕННЫХ ПИРОКСИЛИНОВЫХ ПОРОХОВ*

Б. С. Ермолаев¹, В. Ф. Мартынюк², А. А. Беляев³

Аннотация: Проведено численное моделирование низкоскоростной детонации (НСД) зерненных пироксилиновых порохов. Показано, что наблюдаемая в опытах по взрывному инициированию зависимость скорости НСД от толщины слоя инициирующего взрывчатого вещества (ВВ) есть следствие сравнительно низкой интенсивности химического превращения и ограниченной длины заряда (120 мм в опытах). В этих условиях зона реакции детонационной волны не успевает полностью сформироваться и развитие процесса прерывается на стадии, когда характеристики волны активно изменяются. Эволюция волны отчетливо проявляется на профилях давления, однако траектория фронта, если исключить участок инициирования, имеет почти линейную форму, которой отвечает скорость волны, близкая к постоянной величине. Для формирования стационарной волны необходимы заряды метровой длины. Что касается структуры течения во фронте волны НСД, то в расчетах, как правило, наблюдалась структура, отвечающая газофазному механизму, когда горение пороха инициируется за счет тепла от высокоскоростного газового потока, генерируемого перед фронтом воспламенения. Лишь при пористости 0,2 и менее наблюдается твердофазный механизм (за счет диссипаций при пластических деформациях пористого слоя). Рассмотрены ситуации, когда по мере развития волны НСД эти два механизма сменяют друг друга.

Ключевые слова: низкоскоростная детонация; пироксилиновый порох

Зерненные пироксилиновые пороха, если исключить марки пороха с частицами небольшого размера (например, порох ВУ), обладают большим преддетонационным участком, значительная часть которого приходится на стадию НСД [1, 2]. При воздействии коротким взрывным импульсом, например при инициировании с помощью тонкого слоя пластичного ВВ, используемого в качестве промежуточного детонатора, в заряде зерненного пороха сразу возникают детонационноподобные процессы, которые из-за уровня скорости волны (1,2–1,8 км/с) также относят к НСД [3]. Большая длина зарядов, составляющая, по меньшей мере, несколько десятков сантиметров, на которой процесс НСД распространяется с постоянной

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-03-00294).

¹Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, boris.ermolaev@yahoo.com

²Биологический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, анаора@gmail.com

³Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, belyaevINF@yandex.ru

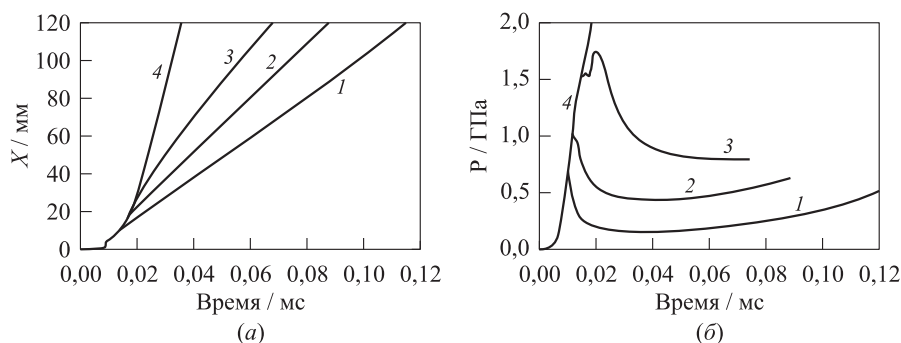


Рис. 1 Траектории фронта волны (а) и временные диаграммы максимального давления (б) в волне, возбуждаемой в заряде длиной 120 мм с начальной пористостью 0,3 при разной длительности инициирующего импульса: 1 — 10 мкс; 2 — 12; 3 — 15; 4 — 16 мкс

или слабо изменяющейся скоростью, открывает перспективы его практического использования в импульсных устройствах с коротким временем срабатывания.

Экспериментальное изучение НСД, проведенное в [2, 3] на одноканальных зерненных пироксилиновых порохах марок ВУфл, ВТМ, 4/1 и 15/1, выявило ряд интересных особенностей.

При взрывном инициировании скорость НСД, сохраняя постоянную величину (кроме пороха марки ВУфл с размером частиц 0,6 мм) после начального переходного участка, оказалась зависящей от толщины слоя инициирующего ВВ. Измерения, проведенные с использованием высокочастотного пьезокварцевого датчика давления, электромагнитного датчика массовой скорости и световолоконного датчика, размещенных в одном сечении заряда, показали, что если рост давления и массовой скорости при прохождении волны происходит практически одновременно, то фронт свечения располагается на 10–20 мкс впереди волны давления (рис. 1). Подобная структура ранее наблюдалась лишь для порохов с крупным размером зерна (пороха марок 15/1 и 6/1) [1, 4] и объяснялась особым «азофазным» механизмом НСД.

В данной работе особенности и своеобразное поведение НСД зерненных пироксилиновых порохов анализируются с помощью численного моделирования. Подробно рассмотрены динамика развития исследуемого процесса, его механизм и те следствия, к которым приводят сравнительно низкие скорости химического превращения, являющиеся основным характерным свойством зоны реакции НСД волны в пироксилиновых порохах. Использована модель, разработанная ранее применительно к переходу горения в детонацию в твердых пористых энергетических материалах [5]. Модель была опробована на пироксилиновых порохах, расчеты дали согласие с экспериментом по деталям механизма переходного процесса и зависимостям длины преддетонационного участка и характеристик конвективного горения от размера частиц пороха, начальной пористости порохового заряда

и свойств оболочки. Основные положения и уравнения модели можно найти в [5], ниже дается краткое описание модели.

Рассматриваемый заряд состоит из сферических зерен пороха одинакового диаметра, которые помещены в цилиндрический канал стальной оболочки с закрытыми торцами. Горение инициируется одним из двух способов.

При «мягком инициировании» в начальный момент времени небольшая часть заряда у одного из торцов оболочки начинает гореть по поверхности гранул. Этот способ качественно воспроизводит режимы инициирования спиралью накалывания, введенной в канал оболочки, или наружным нагревателем, который размещается на торце оболочки.

При «жестком инициировании» заряд поджигается потоком горячих газов, вдуваемых через торец в течение заданного времени. Условия инициирования можно изменять в широком диапазоне, варьируя энергию, плотность потока и длительность вдува газов. Этот способ позволяет моделировать инициирующие воздействия, создаваемые пороховыми устройствами, газовой детонацией, а также взрывом тонкого слоя ВВ.

Горение заряда рассматривается в квазиодномерном приближении (т.е. с учетом возможного радиального расширения канала оболочки) в рамках механики двухфазной реагирующей среды. Зерна пороха составляют твердую фазу, которая ведет себя как идеальное вязкопластическое тело. Продукты горения вместе с газом, первоначально заполнявшим поры, и газом, вдуваемым на стадии инициирования, составляют газовую фазу. Каждая фаза имеет свою внутреннюю энергию, температуру, плотность, давление и скорость течения. Фазы подчиняются разным уравнениям состояния (двучленное уравнение с постоянным коэффициентом Грюнайзена для газовой фазы и уравнение Тэта, определяющее сжимаемость твердой фазы [6]).

Модель учитывает следующие процессы:

- фильтрационное течение газа в порах;
- передачу тепла конвекцией от газа к поверхности частиц пороха;
- движение твердой фазы под действием возникающих напряжений, в ходе которого происходят уплотнение (уменьшение пористости) и вязкопластический разогрев твердой фазы;
- воспламенение и горение пороховых зерен;
- радиальное пластическое расширение канала оболочки, когда давление становится выше предела прочности оболочки.

Зажигание пороха происходит, когда в результате нагрева температура поверхности гранул достигает заданной температуры воспламенения. Нагрев осуществляется под действием двух факторов: конвективной передачи тепла от горячих газов и вязкопластического разогрева при схлопывании пор. Эти факторы могут действовать совместно или по отдельности. Горение зерен происходит по их полной поверхности, включая каналы, Интенсивность горения в единице объема равна

произведению скорости послышного горения, взятой из опытов по горению в бомбе постоянного давления и экстраполируемой в область давлений НСД, и полной удельной поверхности зерен.

Моделирование осуществляется на двух уровнях. Макроуровень составляют уравнения неразрывности, движения, сохранения энергии и состояния для двухфазной среды. Мезоуровень представлен элементарной ячейкой, которая воспроизводит пору и окружающий ее слой пороха. Уравнение теплопроводности, примененное к этой ячейке, определяет распределение температуры и вязкопластическую генерацию тепла в слое пороха, окружающем пору, и используется, чтобы определить момент зажигания.

Задача решается численно с использованием неявной разностной схемы с матричной прогонкой и расщеплением на макро- и мезоуровни. Расчетная сетка по длине заряда, однородная в начальный момент времени, трансформируется в ходе вычислений, сгущаясь в зонах, где градиенты переменных возрастают, и разреживаясь там, где градиенты уменьшаются. Расчетная сетка по толщине свода ячейки на мезоуровне привязана к внутренней границе ячейки и имеет шаг, который увеличивается по закону геометрической прогрессии при удалении от этой границы.

Рассмотрим результаты моделирования. На рис. 1 даны траектории фронта волны и временные диаграммы максимального давления, рассчитанные для заряда пористостью 0,3 из пороха ВТМ при жестком инициировании с разной длительностью вдува. В расчетах воспроизводятся условия опытов из работы [3] (заряд длиной 120 мм и диаметром 20 мм в стальной оболочке с толщиной стенок 10 м, зерна пороха, имеющие удельную поверхность $38 \text{ см}^2/\text{г}$, эффективный диаметр 1 мм и покрытые тонкой 2,5-микронной пленкой поливинилацетата, инициирование взрывом тонкого слоя пластичного ВВ марки ЭВВ-34 на основе тэна), в которых толщина слоя инициатора варьировалась от 1 до 4 мм. Максимальное давление в волне быстро нарастает на стадии инициирования, достигая значений 0,7–1,5 ГПа в зависимости от длительности воздействия. После прекращения вдува максимальное давление быстро спадает в волне разрежения, проходит через минимум и затем вновь начинает расти. При этом траектории фронта, если исключить начальный переходной участок, демонстрируют волну, бегущую с примерно постоянной скоростью. Скорость волны возрастает по мере увеличения длительности инициирующего импульса (10, 12 и 15 мкс), составив, соответственно, 1,06, 1,43 и 1,8 км/с. При длительности выше 15 мкс волна ускоряется и переходит на высокую скорость.

Зависимость скорости волны от длительности инициирующего импульса объясняется тем, что из-за низкой скорости химического превращения при выбранной длине заряда (120 мм) процесс по существу охватывает лишь начальную фазу формирования зоны реакции детонационной волны. Доля сгоревшего пороха невелика и к моменту завершения стадии распространения волны по заряду не превышает 10%. При более длительном инициирующем импульсе давление в волне хотя

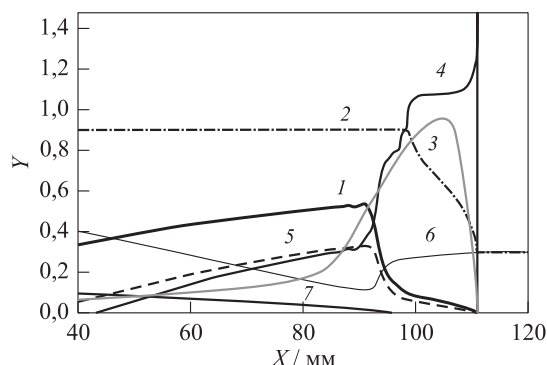


Рис. 2 Характеристики течения во фронте волны НСД в момент времени 73,3 мкс, скорость волны 1,43 км/с (вариант 3 из рис. 1): 1 — давление в ГПа; 2 — температура на поверхности пор в К/1000; 3 — светимость газа (произведение температуры в четвертой степени на пористость), отнесенная к значению в точке максимума; 4 — скорость газа в км/с; 5 — скорость твердой фазы в км/с; 6 — пористость; 7 — доля сгоревшего пороха

и изменяется во времени, в целом оказывается выше, соответственно возрастает скорость волны. Очевидно, однако, что если увеличить длину заряда, дав возможность волне выйти на установившийся режим, то ее характеристики не должны зависеть от условий инициирования. И действительно: расчеты, проведенные с зарядами длиной 1 м, подтвердили этот вывод. Если на начальном участке длиной 200–300 мм волны НСД, возбуждаемые при разной длительности инициирующего импульса, могут сильно различаться по уровню давления, динамике его изменения и скорости волны, то, преодолев это расстояние, волны выходят на установившийся режим, имея, независимо от условий инициирования, постоянную скорость 1,86 км/с и давление 0,89 ГПа.

Структура течения в виде пространственных профилей основных характеристик среды в волне НСД, распространяющейся со скоростью 1,43 км/с, представлена на рис. 2. Видно, что подошва кривых давления и массовой скорости совпадает с пиком скорости течения газа, тогда как точки максимума давления и массовой скорости находятся сзади на расстоянии ~ 20 мм. Воспламенение пороха происходит до точки максимума давления, когда твердая фаза только начинает вовлекаться в движение, тогда как энергия и скорость течения газа имеют высокие пиковые значения. Таким образом, порох поджигается за счет энергии, поступающей от сильно нагретого газа, фильтрующего с высокой скоростью, тогда как волна сжатия твердой фазы не имеет отношения к воспламенению пороха. Передача энергии осуществляется по газовой фазе за счет работы сжатия. Энергия идет на то, чтобы преодолеть сопротивление трения и поддержать высокую скорость фильтрации газа, что приводит к сильному его разогреву. Ранее газофазный механизм НСД в пироксилиновых порохах на-

блюдался при изучении перехода горения в детонацию на порохе 15/1 с зерном размером более 3 мм [4]. На порохе с мелким зерном этот механизм получен впервые.

Расчеты с зарядами разной начальной пористости в диапазоне от 0,4 до 0,2 показали, что при одинаковом инициирующем импульсе чем ниже начальная пористость, тем выше скорость волны. Эти результаты качественно воспроизводят эффект, наблюдаемый в экспериментах. Однако расчеты при пористости 0,2 дали еще один результат: оказалось, что в этом случае, в отличие от вариантов с более высокой пористостью, в ходе развития волны течение в голове волны, которое на начальной фазе отвечает газофазному механизму, затем полностью перестраивается. Картина течения начинает изменяться почти сразу после окончания инициирования, пик в газовой фазе в голове волны «рассасывается» и вперед выходит волна сжатия, бегущая по твердой фазе, которая поджигает порох за счет диссипативного нагрева при схлопывании пор. Таким образом, перестройка структуры волны завершается сменой механизма возбуждения химического превращения пороха, от газофазного к твердофазному механизму. Структура течения при твердофазном механизме НСД показана на рис. 3.

Расчеты с различным диаметром порохового зерна, отвечающим маркам ВУ, ВТМ и 4/1, показали, что при прочих равных условиях уменьшение диаметра зерна вызывает рост скорости детонационной волны. Более того, для пороха марки ВУ, в отличие от более крупных порохов, расчет предсказывает заметное ускорение НСД при длине заряда 120 мм (от 1,46 до 1,87 км/с). Эти результаты находятся в согласии с экспериментальными данными, приведенными в [3].

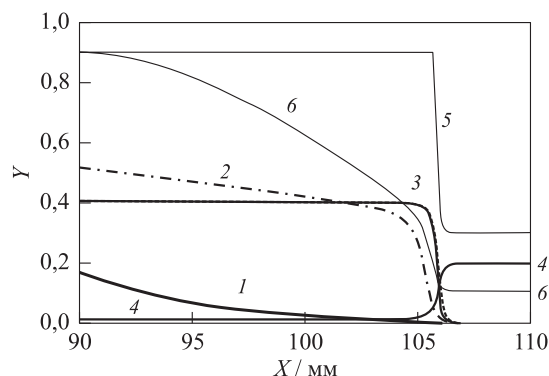


Рис. 3 Картина течения во фронте волны при твердофазном механизме, зерненный порох ВТМ, начальная пористость 0,2, скорость волны НСД 1,85 км/с: 1 — давление в ГПа; 2 — полное давление, включающее межгранулярное напряжение в твердой фазе, в ГПа; 3 — скорость газа и твердой фазы в км/с (кривые практически сливаются); 4 — пористость; 5 — температура на поверхности пор в К/1000; 6 — внутренняя энергия газа, отнесенная к теплоте сгорания пороха

Наконец, были проведены расчеты по переходу горения в детонацию с мягким инициированием для зарядов с пористостью 0,4 из порохов ВУ, ВТМ, 4/1 и 15/1. Показано, что во всех случаях, кроме пороха 15/1, переход от конвективного горения к режиму НСД осуществляется за счет твердофазного механизма (вязкопластический разогрев в пластической волне перед фронтом волны конвективного горения). Однако в дальнейшем течение в волне НСД быстро перестраивается, переходя к структуре, отвечающей газофазному механизму. На порохе 15/1, в согласии с опытом [4], благодаря крупному зерну реализуется чисто газофазный механизм.

Переход к НСД в порохах более мелких марок за счет твердофазного механизма соответствует опытным данным [1], о последующей перестройке механизма никакой информации нет. Однако, анализируя фоторегистрограммы перехода в детонацию для порохов этих марок [1], можно отметить резкое усиление свечения фронта, которое наблюдается на стадии НСД спустя некоторое время после перехода от конвективного горения. Это усиление свечения, вполне возможно, как раз и отвечает той смене механизма, которая получена в расчетах.

Детали пространственной структуры волны, рассчитанные для стадии газофазного механизма НСД в ходе переходного процесса, находится в хорошем согласии с опытными данными, которые приводятся в [3]. Эти данные получены на порохах 4/1 и 15/1 с использованием трех датчиков: электромагнитного датчика массовой скорости, высокочастотного пьезокварцевого датчика давления и фотодиодного датчика, размещенных в одном сечении заряда. Рассмотрено влияние размера частиц пороха на размеры пространственных зон и темпы роста давления и массовой скорости во фронте волны.

Итак, с помощью численного моделирования показано, что зависимость скорости НСД от толщины тонкого слоя пластикового ВВ, применяемого в качестве взрывного инициатора, которая наблюдается в опытах с зерненными пироксилиновыми порохами, есть следствие сравнительно низкой интенсивности химического превращения и ограниченной длины заряда (120 мм в опытах и расчетах). В этих условиях зона реакции детонационной волны не успевает полностью сформироваться, и развитие процесса прерывается на стадии, когда характеристики волны активно изменяются. Эволюция волны отчетливо проявляется на профилях давления, однако траектория фронта, если исключить участок инициирования, имеет почти линейную форму, которой отвечает скорость волны, близкая к постоянной величине. Для выхода на установившийся режим необходимы заряды метровой длины.

Дан анализ структуры течения во фронте волны и связанных с ней механизмов возбуждения химического превращения во фронте волны НСД. В расчетах преимущественно наблюдалась структура, отвечающая газофазному механизму, когда горение пороха инициируется за счет тепла от высокоскоростного газового потока, генерируемого перед фронтом воспламенения. Лишь при пористости 0,2 и менее наблюдается твердофазный механизм (за счет диссипаций при пластических де-

формациях пористого слоя). Рассмотрены ситуации, когда по мере развития волны НДС один механизм сменяет другой.

Литература

1. *Окунев В. А.* Развитое конвективное горение и переход в низкоскоростную детонацию в пористых пороховых зарядах. Дисс. . . . канд. физ.-мат. наук. Москва, 1989. 143 с.
2. *Мартынюк В. Ф., Сулимов А. А., Чеканов С. В., Сукоян М. К.* Структура волны низкоскоростной детонации в пироксилиновых порохах // Хим. физика, 1992. Т. 11. № 2. С. 293.
3. *Ермолаев Б. С., Мартынюк В. Ф., Беляев А. А., Сулимов А. А.* Низкоскоростные режимы детонации зерненного пироксилинового пороха // Хим. физика, 2014. Т. 33. № 6. С. 64.
4. *Ермолаев Б. С., Сулимов А. А., Окунев В. А., Хасаинов Б. А.* О механизме низкоскоростной детонации в крупнозерненной нитроклетчатке // Фундаментальные проблемы физики ударных волн. — Черногловка: ОИХФ РАН, 1987. Т. 1. Ч. 1. С. 40.
5. *Ермолаев Б. С., Беляев А. А., Сулимов А. А.* Численное моделирование перехода горения в детонацию в пироксилиновых порохах // Хим. физика, 2004. Т. 23. № 1. С. 67.
6. *Физика взрыва / Под ред. Л. П. Орленко.* — М.: Физматлит, 2002. Т. 1. 823 с.

Поступила в редакцию 01.11.14

FEATURES OF LOW-VELOCITY DETONATION OF GRAINED SINGLE-BASE PROPELLANTS

B. S. Ermolaev¹, V. F. Martynyuk², and A. A. Belyaev¹

¹N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation

²Biological Faculty, M. V. Lomonosov Moscow State University, 1-52 Leninskiye Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation

Abstract: Numerical modeling of low-velocity detonation of grained single-base propellants has been fulfilled. It is shown that the effect of thickness of initiating layer of high explosive on velocity of low-velocity detonation is the consequence of two factors: rather low intensity of chemical conversion and insufficient length of the charge (120 mm in experiments). Under these conditions, the detonation reaction zone has no time to be totally developed and the wave characteristics continue their active change. Evolution of the wave manifests itself evidently through developing the pressure profile, but the flame front trajectory, with the exception of the initiation stage, demonstrates almost linear shape, with the wave velocity of near constant value. In order to get steady mode, one needs the charge of 1-meter length. Analysis of the flow structure at the low-velocity detonation front has shown that the structure responsible for the gas-phase mechanism is typically observed in calculations, when the propellant burning is initiated by heat transmitted from the high-velocity high-temperature gas flow generated before the flame front. And only at porosity 0.2 and less, the solid phase mechanism (initiation

due to dissipation during the viscous plastic deformations of the porous body) has been observed. The situations are considered when in the course of developing, the low-velocity detonation, these two mechanisms replace one the other.

Keywords: low-velocity detonation; single-base propellant

Acknowledgments

The work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 13-03-00294).

References

1. Okunev, V. A. 1989. Razvitoe konvektivnoe gorenje i perekhod v nizkoskorostnyuyu detonatsiyu v poristykh porokhovykh zaryadakh [Developed convective burning and transition into low-velocity detonation in porous propellant charges.] D.Sc. Diss. Moscow. 143 p.
2. Martynyuk, V. F., A. A. Sulimov, C. V. Chekanov, and M. K. Sukoyan. 1992. Struktura nizkoskorostnoy detonatsii v pyroksilinovykh porokhakh [Structure of low-velocity detonation wave in pyroxylin powders]. *Khim. Fiz.* 11(2):293.
3. Ermolaev, B. S., V. F. Martynyuk, A. A. Belyaev, and A. A. Sulimov. 2014. Nizkoskorostnye rezimy detonatsii zernennogo pyroksilinovogo porokha [Low-velocity detonation modes of grained pyroxylin powders]. *Russ. J. Phys. Chem. B* 8(3):376.
4. Ermolaev, B. S., A. A. Sulimov, V. A. Okunev, and B. A. Khasainov. 1987. O mekhanizme nizkoskorostnoy detonatsii v krupnozernenoy nitrokletchatke [On the mechanism of low-velocity detonation of coarse-grained nitrocellulose]. *Fundamental problems of shock physics*. Chernogolovka: Dep. of IChP RAS. 1:40.
5. Ermolaev, B. S., A. A. Belyaev, and A. A. Sulimov. 2004. Chislennoe modelirovanie perekhoda gorenija v detonatsiyu v pyroksilinovykh porokhakh [Numerical modeling of deflagration-to-detonation transition in pyroxylin powders] *Khim. Fiz.* 23(1):67.
6. Orlenko, L. P., ed. 2002. *Fizika vzryva* [Physics of explosion]. Moscow: Fizmatlit. Vol. 1. 823 p.

Received November 1, 2014

Contributors

Ermolaev Boris S. (b. 1940) — Candidate of Science in physics and mathematics, head of laboratory, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; boris.ermolaev@yahoo.com

Martynyuk Vasily F. (b. 1952) — Doctor of Science in technology, Deputy Dean, Biological Faculty, M. V. Lomonosov Moscow State University, 1-52 Leninskiye Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation; anaopa@gmail.com

Belyaev Andrey A. (b. 1954) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; belyaevIHF@yandex.ru