

УДК 08; 536.43 (575.2) (04)

МЕХАНИЗМ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭНЕРГИИ В ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЕ

Н.М. Калинина – докт. техн. наук,

В.И. Нифадьев – акад. НАН КР, докт. техн. наук

The mechanism of generation of coherent radiation in a detonation wave of low-density explosive mixtures is considered. It is shown that the possibility of such a mechanism is connected to processes of selforganizing. As a result of selforganizing a plasma cluster with a fractal pattern is forming in a zone of chemical reaction.

Процесс детонации представляет собой самоподдерживающееся распространение по заряду зоны химического превращения взрывчатого вещества, сопровождающееся выделением большого количества энергии за короткий промежуток времени.

Возникновение понятий *детонация* и *детонационная волна* относится к концу XIX в., к тому периоду времени, когда в результате открытия бризантных взрывчатых веществ на смену пороху пришли такие мощные взрывчатые вещества, как нитроглицерин, динамит, пироксилин, аммонит, тротил, гексоген и др.

С точки зрения классической теории детонации считалось, что в процессе взрыва бризантных взрывчатых веществ (ВВ) в детонационной волне ничего примечательного не происходит: из первоначального хаоса, т.е. исходных химических компонентов, находящихся в твердом или жидком состоянии, порождается хаос более высокой степени – образуются конечные продукты взрыва, в основном в газообразном состоянии. При этом превращение взрывчатого вещества в мощные ВВ происходит скачкообразно, во фронте ударной волны, распространяющейся по заряду с постоянной скоростью.

За 100 лет, т.е. к концу XX в., у специалистов по теории детонации накопилось много вопросов, связанных с несоответствием ре-

зультатов экспериментов существующим теоретическим представлениям. Ученые принялись за поиски других, более адекватных опытным данным, чем ударный скачок, механизмов передачи энергии в детонационной волне конденсированных взрывчатых веществ, в том числе и бризантных.

Экспериментально было установлено, что уменьшение насыпной плотности мощных взрывчатых веществ или значительное увеличение диаметра заряда приводит к образованию на стенках металлических трубок, а на стенках горных выработок, в которых взрывался заряд, следов-отпечатков продуктов детонации, свидетельствующих о более сложном протекании процессов в детонационной волне, нежели это представлялось прежде.

И только переход от мощных бризантных взрывчатых веществ к низкоплотным взрывчатым смесям дал возможность обнаружить [1] в детонационной волне необычайное многообразие долгоживущих состояний, через которые проходят промежуточные продукты взрывчатого превращения в условиях пониженных значений температуры и давления за счет снижения плотности взрывчатых веществ.

Было открыто, что между отмеченными выше состояниями хаоса возникают состояния упорядоченности, в которых раскаленные до температур порядка 1500°C промежуточные

продукты химических реакций отличаются тонкостью и разнообразием структуры. В этих состояниях газообразные продукты, объединенные в сложные целостности, ведут себя как единый физико-химический организм. Они могут перетекать по стеклянным трубкам, сохраняя свою целостность; могут изменять форму под действием внешних электрических и магнитных полей; могут изменять свою структуру при столкновении с преградами; могут выжигать на пластинах из органического стекла узоры, отражающие тонкую иерархическую организацию их структуры.

В мощных ВВ детонация является стационарным процессом, т.е. протекает с постоянной скоростью по всей длине заряда. В отличие от стационарной детонации бризантных ВВ детонация низкоплотных смесей, состоящих из сильно неоднородных компонентов (как по плотности, так и по составу), носит пульсирующий характер, обусловленный последовательным чередованием самоускорения и самозамедления процессов, протекающих в зоне химического превращения исходного вещества. Эта зона соответствует длине детонационной волны, и ее протяженность при пульсирующей детонации может достигать $5\div 15$ см и более (в зависимости от плотности и компонентного состава смеси), в то время как при стационарной детонации мощных взрывчатых веществ длина волны не превышает длины пробега молекулы, т.е. нескольких миллиметров.

На примере детонации низкоплотных взрывчатых смесей можно рассмотреть основные закономерности эволюционных процессов, наблюдаемых в неоднородных нелинейных средах самой различной природы. Эти закономерности связаны, в первую очередь, с процессами самоорганизации, протекающими в детонационной волне на ее различных структурных уровнях. Им присущи цикличность, фрактальность, необратимость, скачкообразная смена состояний, иерархический принцип организации.

Говоря языком синергетики, глобальным аттрактором, или конечным состоянием, которым завершается детонация, являются конечные продукты взрыва, образующиеся с выделением максимально возможного количества энергии заряда.

Наибольший интерес с точки зрения самоорганизации представляет промежуточное состояние, через которое проходят продукты разложения (газификации) взрывчатой смеси, названное авторами детонационной плазмой. Это состояние проявляется в образовании своеобразного плазменного сгустка – фрактального кластера с достаточно большим запасом химической энергии и значительными силами сцепления между образующими его элементами.

По мере распространения детонации вдоль заряда уменьшается интенсивность свечения кластера, увеличивается его объем, усложняется структура. Увеличение объема происходит как за счет уменьшения избыточного давления в кластере, так и за счет присоединения к нему новых порций промежуточных продуктов (рис. 1).

Большое влияние на характер структуры детонационной плазмы оказывают свойства оболочек, в которые помещаются заряды: их прочность, хрупкость, пластичность, теплопроводность и т.п. От этих свойств в первую очередь зависит степень открытости системы (детонационной волны), а, значит, характер ее тепло- и массообмена с окружающей средой. Так, незначительного увеличения плотности оболочки достаточно для того, чтобы структура плазменного сгустка стала более сложной, чем при взрывании в бумаге (рис. 2).

При замене бумажных и целлюлозных оболочек тонкостенными стеклянными трубками начинает ярко проявляться спиралевидный характер детонационной плазмы. Это связано с увеличением степени закрытости системы и соответствующим повышением температуры и давления в реакционной зоне. Изображение спиралей получается на фотопленке особенно четким в том случае, когда в состав взрывчатой смеси вводятся инертные добавки, например, сажа.

При снижении плотности заряда до предельных значений вместо спиральной структуры в продуктах детонации наблюдаются беспорядочные, хаотически расположенные формы, а сам процесс детонации превращается в процесс затухающего горения.

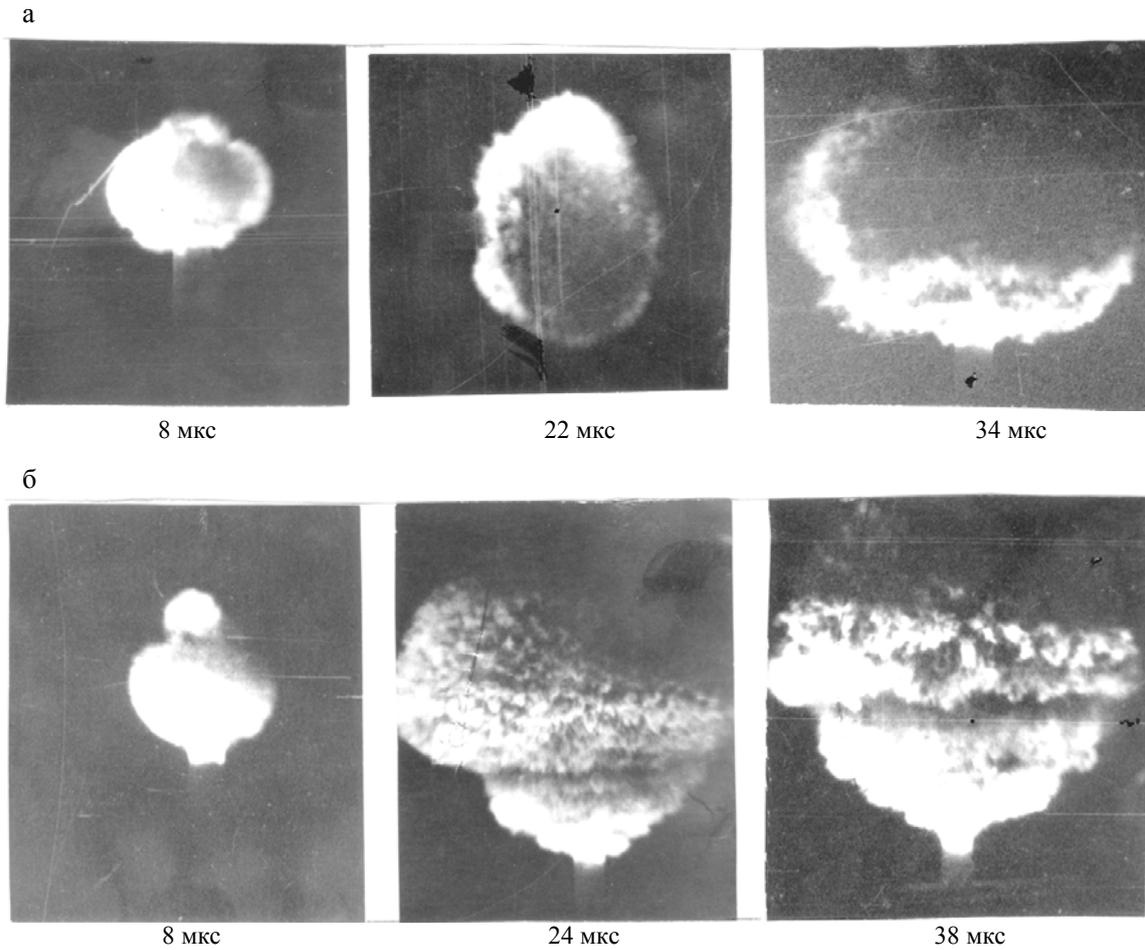


Рис. 1. Эволюция структуры фрактального кластера при детонации заряда низкоплотной взрывчатой смеси в бумажной оболочке (а) и в целлулоидной (б).

Изучение отпечатков детонационной плазмы, полученных на пластинах из оргстекла и латуни, позволило выявить их тонкую структуру на нескольких масштабных уровнях. Установлено, что структуры, составляющие сгусток промежуточных продуктов детонации, самоподобны по форме, иерархически организованы, имеют дробную размерность. Схематически тонкая структура детонационной плазмы показана на рис. 2.

Специальными опытами было установлено также, что детонационная плазма ведет себя как единое целое, перетекая по стеклянным трубкам различной конфигурации и диаметра, и сохраняет свою целостность при выходе из трубок в воздух.

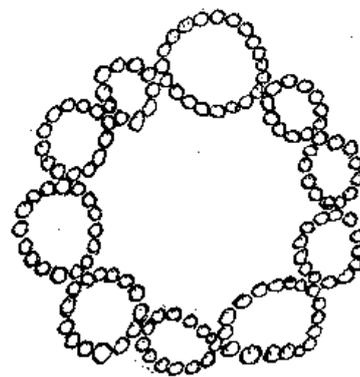


Рис. 2. Схема тонкой структуры детонационной плазмы

Детонационная плазма способна достаточно быстро перестраивать свою структуру в зависимости от изменения различных внешних факторов, предусматриваемых экспериментом.

В то же время важнейшим свойством такого состояния, без которого пульсирующая детонация в принципе не могла бы самостоятельно распространяться, является его устойчивость, метастабильность, выражающаяся в высокой продолжительности жизни продуктов детонации в структурированном виде.

Основное свойство приведенной структуры – это фрактальность. *Фрактал* (от англ. *fractal*) означает дробный. Фрактальная структура характеризуется дробной размерностью, которая применительно к эволюционному процессу отражает степень наполненности системы некоторым фазовым состоянием.

Фрактальные структуры – это так называемые “дырявые” поверхности и объемы.

Фрактальность означает, что система иерархически организована, структуры ее разных уровней самоподобны (“как внизу, так и наверху”) и объединены в единое целое. В то же время элементы системы с фрактальной размерностью обладают повышенным числом степеней свободы в сравнении с элементами

систем, имеющих обычную сплошную (уплотненную) структуру.

Одно из замечательных свойств систем с фрактальной структурой состоит в том, что они способны к согласованному действию. И чем более подвижна структура системы, тем скорее она перестроится и перейдет в состояние когерентности. Когерентность в данном случае можно рассматривать как высшую степень согласованности в поведении элементов сложной целостной системы, благодаря которой можно получить очень высокое качество совместного импульса действия, т.е. его концентрированность, направленность, монохроматичность.

При детонации низкоплотных смесей подвижность структуры фрактального кластера проявляется при помещении заряда во внешние электрические и магнитные поля, а также между пластинами и экранами из различных инертных материалов. При таких воздействиях сразу во всем объеме вещества изменяются структура и интенсивность свечения (рис. 3), а при соответствующих значениях напряженности электрического поля происходит полное прекращение процесса детонации.

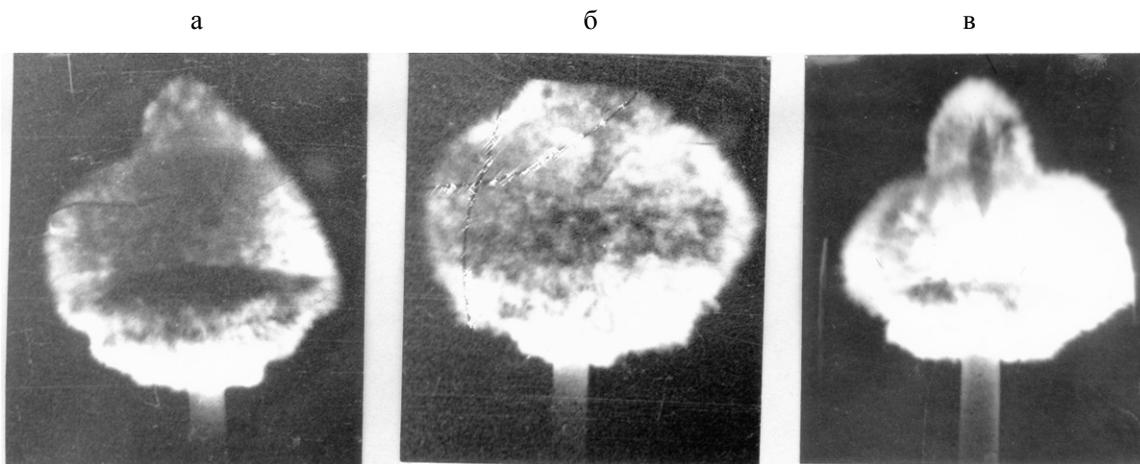


Рис. 3. Перестройка структуры фрактального кластера во внешнем постоянном электрическом поле и под влиянием металлических экранов:

а – силовые линии поля параллельны продольной оси заряда; б – силовые линии поля перпендикулярны продольной оси заряда; в – заряд детонирует между двумя вертикально расположенными металлическими пластинами, напряжение отсутствует.

В таких экспериментах поля и пластины можно рассматривать как управляющие параметры, вызывающие необходимость адаптации сложной целостной системы к изменению их характеристик.

В качестве внутренних управляющих параметров можно рассмотреть такие свойства компонентов, как упругость, объемная плотность, структура, химическая активность исходных компонентов, наличие в них катализаторов, приводящих к самоускорению или самозамедлению процессов.

Незначительные отклонения в значении отдельных характеристик компонентов и условий взрывания могут привести к переходу детонации на другой режим, что сразу же сказывается на скорости распространения процесса и полноте энерговыделения. В то же время при оптимальных условиях взрывания детонация носит устойчиво пульсирующий характер. Эти особенности пульсирующей детонации свидетельствуют о высокой степени неустойчивости процесса и его нелинейности.

В зависимости от количества добавок их роль может быть как положительной, так и отрицательной. Так, в некоторых случаях замедление процессов, вызываемое введением веществ-флегматизаторов в состав взрывчатой смеси, может способствовать увеличению энерговыделения за счет того, что все компоненты смеси, очень неоднородные по своим свойствам, успевают полностью газифицироваться и прореагировать между собой. Однако если таких добавок будет слишком много, они превратятся в балласт, на который нужно будет тратить дополнительную энергию. В результате к.п.д. взрыва понизится, или же детонация попросту прервется, затухнет. Следует отметить, что в детонационных процессах, протекающих в зарядах пониженной плотности, чувство меры при выборе компонентного состава имеет особое значение.

На примере детонационной волны можно рассмотреть некоторые циклические закономерности развития сложных нелинейных систем. Как показали исследования, направленные на изучение механизма детонации низкоплотных и сверхнизкоплотных взрывчатых смесей [1], детонационная волна представляет собой сложный спектр так называемых

волн-предшественников, которые можно охарактеризовать в соответствии с терминологией [2], как набор структур-аттракторов, находящихся в иерархической подчиненности по отношению друг к другу.

На уровне каждой из этих структур происходит скачкообразная смена термодинамического состояния взрывчатой смеси, сопровождающаяся выделением тепла. В течение полного цикла, соответствующего периоду детонационной волны, исходная смесь проходит через несколько промежуточных состояний и на завершающей стадии превращается в конечные продукты детонации – окислы углерода, азота, воду и сажу.

На каждой из промежуточных стадий во взрывчатой смеси возникает соответствующее этой стадии состояние, которое может быть охарактеризовано как диссипативная структура, распределенная сразу по всему объему зоны химической реакции. Протяженность этой зоны, как указывалось выше, может составлять от 3–5 до 15–16 см в зависимости от плотности заряда.

Фрактальная размерность (мощность) диссипативной структуры растет по мере перехода процесса на более высокие уровни и соответствующего вовлечения в реакцию все большего и большего количества вещества.

Если заряд помещен в прочную массивную оболочку и фрактальный кластер не может выйти в воздух, то на завершающей стадии описанного сложного цикла происходит сжатие сформировавшегося фрактального кластера расширяющимися газами, образовавшимися в предыдущем цикле взрывчатого превращения смеси. В результате такого динамического сжатия (которое можно рассматривать как скручивание спирали) происходит разрушение связей в структуре кластера, или ее хаотизация, вследствие чего компоненты, из которых был рожден кластер, получают возможность вступить в химическую реакцию друг с другом. Протекание этой реакции сопровождается выделением большого количества тепла и газов, т.е. максимальным ростом энтропии, а сложная самоорганизующаяся нелинейная система на рассмотренном участке прекращает свое существование.

Но детонация продолжает распространяться дальше по длине заряда, поскольку фрактальный кластер в течение своей «жизни», т.е. в течение промежутка времени от начала образования и до момента его взрывчатого разрушения, успевает послать далеко вперед высокоинтенсивный импульс излучения – предвестник (и инициатор) разворачивания нового цикла, новой эволюционной спирали.

Генерирование согласованного импульса излучения детонационной плазмой свидетельствует о повышении качества энергии в детонационной волне.

Скоростная съемка позволила установить механизм, благодаря которому детонационная плазма периодически проявляет себя подобно химическому лазеру.

При импульсном сжатии когерентного вещества происходит то, что в нелинейной оптике называется эффектом сверхизлучения – энергия лучистого потока становится еще более концентрированной, зависимость мощности суммарного импульса от числа излучающих частиц становится нелинейной. И чем менее разнообразной будет структура когерентного вещества в этот момент, чем меньше энергетических уровней будет в нем при этом, тем более согласованным и интенсивным будет импульс.

На рис. 4 схематично показано, как изменяется структура детонационной плазмы при быстром сжатии, т.е. в режиме с обострением. Увеличение концентрации энергии в

системе сопровождается упрощением структуры на всех уровнях, но целостность системы не нарушается. Поэтому, несмотря на то, что внутри системы, казалось бы, исчезают все формы она выбрасывает мощный импульс энергии, проявляя себя при этом как единое целое.

На рис. 5 показаны самофокусирующиеся пучки когерентного излучения, генерируемого сжатой детонационной плазмой, распространяющиеся далеко вглубь еще не прореагировавшего вещества.

При подходе фронта детонации к электрически заряженной пластине эффект усиливается – отдельные пучки как бы сливаются в один, но в то же время не утрачивают своей индивидуальности.

Роль когерентного излучения при детонации заключается в том, что оно в силу своей высокой проникающей способности начинает подготавливать компоненты смеси к протеканию химических реакций задолго до того, как к ним подойдет фронт ударной волны. Благодаря объемному действию интенсивного лучистого потока вещество переходит в возбужденное состояние, и переход этот происходит в несколько стадий: вначале в процесс включаются наиболее чувствительные к электромагнитному излучению элементы (в данном случае гранулы вспененного полистирола), затем процесс приобретает самоускоряющийся характер и протекает по механизму автокатализа, цепных реакций или теплового самоускорения.

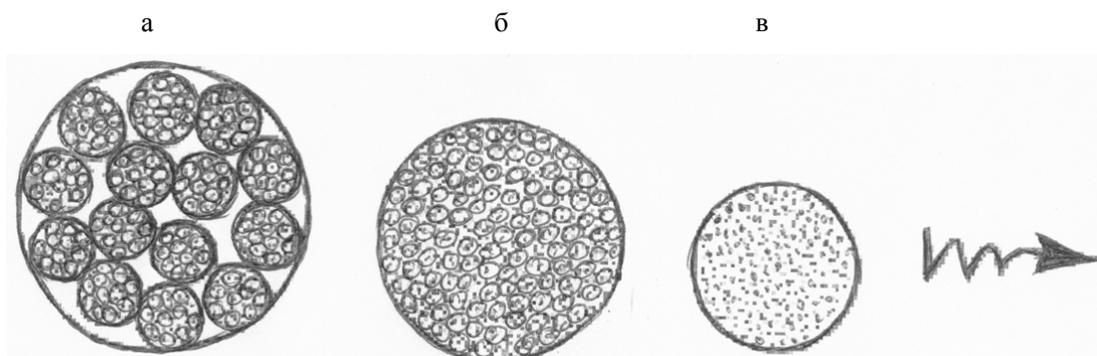


Рис. 4. Упрощение структуры фрактального кластера при импульсном сжатии детонационной плазмы

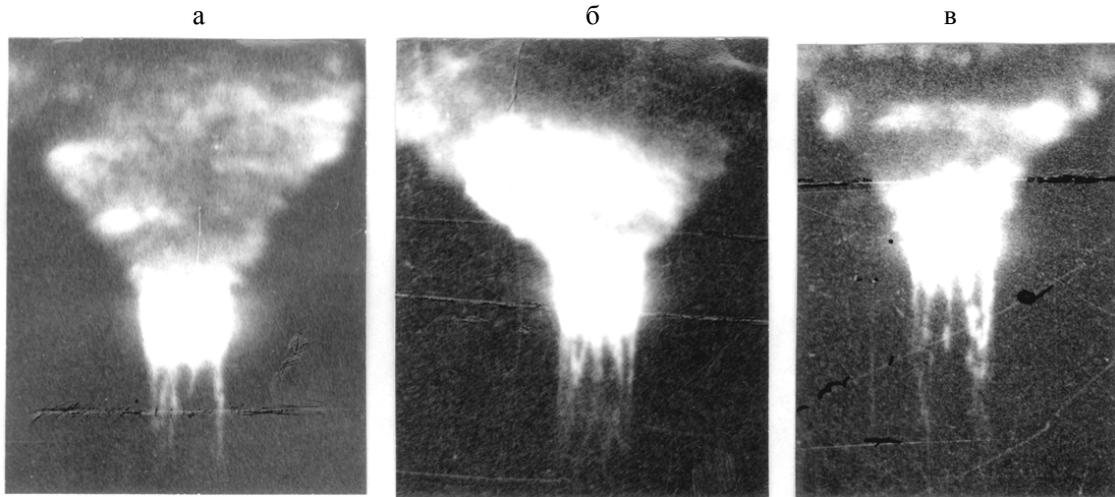


Рис. 5. Самофокусирующиеся пучки впереди фронта детонационной волны при взрыве зарядов разной плотности: а – $0,3 \text{ г/см}^3$; б – $0,5 \text{ г/см}^3$; в – то же, в электрическом поле.

В итоге лучистый поток, погружаясь в плотное, инертное вещество, становится тем инициирующим импульсом, благодаря которому происходит образование очередной порции детонационной плазмы: активной, пульсирующей, реагирующей на внешние воздействия и подчиняющейся законам своего существования – управляющим параметрам. Этот новый физико-химический организм, развившись, сам станет источником мощного излучения и породит следующую фрактальную структуру и т.д. до тех пор, пока не прореагирует вся взрывчатая смесь в заряде.

Так, вопреки второму закону термодинамики, в предоставленной самой себе системе высокоинтенсивный когерентный импульс промежуточных продуктов детонации рождает из хаоса, т.е. из исходной взрывчатой смеси, находящейся в равновесном состоянии, новую долгоживущую целостность – фрактальный кластер, также способный к согласованной перестройке собственной структуры и повышению качества энергии в зоне химической реакции за счет излучения когерентного потока лучистой энергии.

Насколько же новый цикл будет похож на предыдущий? Это зависит от состава взрывчатой смеси на новом участке, а также от тех корректив, которые могут быть внесе-

ны в процесс детонации в результате изменения внешних управляющих параметров. Например, картина будет резко меняться, если зарядная трубка, в которую помещается взрывчатая смесь, на одном участке изготовлена, например, из стали, на другом – из стекла, а на третьем – из бумаги. Значительное различие в циклах возникнет и в том случае, когда заряд на каком-то из участков по своей длине окажется в области действия внешнего электрического или магнитного поля.

Кроме того, даже без внешнего вмешательства абсолютная идентичность циклов в принципе невозможна, поскольку невозможно приготовить совершенно одинаковые порции взрывчатой смеси даже в пределах одного заряда, так как неоднородность заряда заведомо обуславливается неоднородностью исходных компонентов, возникающей еще на стадии их получения (в процессе полимеризации, грануляции и т.д.). Поэтому и циклы взрывчатого превращения в детонационной волне могут быть только похожими (подобными), но не тождественными.

Особенно большая разница во внутреннем содержании циклов возникает при значительных изменениях масштабов заряда. Так, по структурной организации процессов в детона-

ционной волне детонация одного грамма взрывчатого вещества совсем не одно и то же, что детонация одного килограмма или одной тонны. Эта разница будет выражаться, в первую очередь, в разном количестве структурных уровней в детонационной волне: чем больше размеры системы, тем больше может быть в ней структурных уровней.

Сопоставление процессов, протекающих в детонационной волне низкоплотных взрывчатых смесей, с процессами, наблюдаемыми в социальных, экономических [3, 4], а также в биологических системах [5], показывает, что в характере эволюции этих систем, несмотря на их внешнее различие, присутствует много общего. Поэтому процесс детонации можно с определенной степенью приближения рассматривать в качестве аналога самоорганизующихся систем самой различной природы.

Более того, изучение особенностей распространения детонационной волны, связанных с процессами самоорганизации, позволяет обнаружить в них множество аналогий тем идеям и смыслам, которые даны человечеству многие века назад через Библию, Коран, учения Востока и др. Еще доступней сознанию современного человека, вооруженного знаниями из области физики, химии, синергетики, биофизики, психологии, философии, эволюционные идеи, отраженные в “Тайной Доктрине” Е.П. Блаватской, в Агни-Йоге (Учение Живой Этики) Е.И. Рерих, в “Гранях Агни Йоги” Б.Н. Абрамова, переданные человечеству совсем недавно, в XIX и XX в. [6].

Более подробно с особенностями процессов самоорганизации в детонационной волне можно ознакомиться в электронном варианте статьи [7], размещенном на Всероссийском сайте “Синергетика” (<http://spkurdyumov.narod.ru>). На этом же сайте, организованном известным специалистом в области исследования динамических

открытых нелинейных систем академиком С.П. Курдюмовым, размещены статьи ведущих специалистов в области теории самоорганизации, в которых сквозь призму синергетики рассматриваются проблемы философии, биологии, истории, социологии, эволюции и др.

Литература

1. *Нифадьев В.И., Калинина Н.М.* Низкоплотные и сверхнизкоплотные взрывчатые смеси. Механизм детонации. – Бишкек: Илим. 1998.
2. *Князева Е.Н., Курдюмов С.П.* Антропный принцип в синергетике // Вопросы философии. – №3. – 1997. – С. 62–79.
3. *Калинина Н.М.* Миграция как способ адаптации системы к изменению управляющих параметров // Материалы научн.-практ. конф. “Внешняя миграция русскоязычного населения Кыргызстана: проблемы и последствия”. – Бишкек: Илим, 2000. – С. 66–80.
4. *Калинина Н.М.* Синергетика – объединительный фактор естественно-технических и гуманитарных наук // Актуальные проблемы образования и духовной культуры Кыргызстана в евразийском пространстве: Тр. Института мировой культуры. – Вып. II. – Бишкек – Лейпциг: Илим, 2001. – С. 121–130.
5. *Яшин А.А.* Информационно-полевая самоорганизация биосистем // Вестник новых медицинских технологий. – 2000. – Т. VII. – № 1. – С. 30–38.
6. *Калинина Н.М.* На пути от Альфы к Омеге // Государственность и религия в духовном наследии Кыргызстана / Тр. Института мировой культуры. – Вып. III. – Бишкек – Лейпциг: Илим, 2003. – С. 197–222.
7. *Калинина Н.М., Нифадьев В.И.* Процессы самоорганизации в детонационной волне низкоплотных взрывчатых смесей. <http://spkurdyumov.narod.ru/Kriz.htm>.