

II. Пожарная и промышленная безопасность

В.В. Азатян

д-р хим. наук, проф., член-корр. РАН, заведующий лабораторией ФГБУН Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН

Т.Р. Тимербулатов

д-р экон. наук, президент ООО «Группа компаний «КОНТИ»

С.В. Шатилов

канд. техн. наук, заместитель председателя Комитета Совета Федерации по промышленной политике Федерального Собрания РФ

УДК 541.124.7+541.126

ЭФФЕКТИВНЫЕ ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ГОРЕНИЕМ, ВЗРЫВОМ И ДЕТОНАЦИЕЙ ГАЗОВ

Приведены теоретические основы и химические методы и средства для управления горением, взрывом и детонацией водорода, метана и синтез-газа, в том числе радикального уменьшения опасности их возгорания, взрывов и детонации в различных производствах, при хранении, транспортировке и применении. Разработан подход к управлению различными режимами горения, позволяющий предотвратить детонацию в каналах, а также разрушить стационарную детонационную волну на заданном расстоянии от места ее возникновения.

Ключевые слова: ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, УПРАВЛЕНИЕ, ПРОЦЕСС ГОРЕНИЯ, ВЗРЫВ, ДЕТОНАЦИЯ ГАЗОВ, ИНГИБИТОР, ПОДАВЛЕНИЕ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ, ОКИСЛЕНИЕ

Развитие промышленности и техники сопровождается все более широким использованием метана и водорода в различных производствах и в энергетике. Возрастает также количество этих газов, образующихся в качестве побочного продукта. Соответственно разработана эффективных методов управления процессами горения и взрыва газов и в том числе предотвращения взрывов и детонации, а также способов оптимизации работы силовых установок, использующих эти вещества в качестве топлива, является одной из важнейших народнохозяйственных и научно-технических проблем. Решение проблемы взрывобезопасности особенно актуально в связи с постоянной опасностью возгорания и

взрыва метана в угольных шахтах и водорода на атомных электростанциях. Проблема оптимизации режимов горения метана и водорода, т.е. регулирования интенсивности процесса, связана с увеличивающимися объемами использования этих газов в различных силовых установках, а также в качестве энергоносителя.

До последнего времени способы предотвращения горения и взрыва смесей горючих газов с воздухом имели в основном нехимический характер (огнепреградители, искрогасители, сильное разбавление инертными газами и др.). Такие способы имеют ограниченное применение и далеко не всегда эффективны. Поскольку процессы горения

представляют собой химические реакции, то наибольшую эффективность воздействия следует ожидать от способов, непосредственно влияющих на химический механизм и тем самым воздействующих на скорость процесса путем изменения механизма.

Ранее в качестве химических средств в пожаротушении использовались лишь некоторые галогенпроизводные углеводородов, преимущественно бромсодержащие хладоны, например тетрафтордибромэтан, применение которых, однако, ограничено недостаточной их эффективностью и коррозионной агрессивностью. Для заметного эффекта подавления горения требуются такие большие добавки этих

веществ, что их действие не без основания объясняют в основном разбавлением горючей смеси и увеличением ее теплоемкости [1,2]. Бромсодержащие хладоны, кроме того, токсичны, не стойки при хранении и не пригодны как превентивные средства. В настоящее время по рекомендации ряда международных конвенций, в том числе Монреальской и Токийской, их производство приостановлено.

Отсутствие эффективных химических методов и средств предотвращения горения и взрыва газов во многом было обусловлено устоявшимися в течение длительного времени представлениями об основных факторах, определяющих явления горения, взрыва и детонации газов, закономерности этих процессов.

Два разных фактора, определяющих процессы горения

Напомним, что воспламенение и развивающееся горение – это кинетический режим химического процесса, в котором реакция протекает с усиливающимся во времени самоускорением и достигаются большие скорости превращения исходных реагентов [3,4]. Под самоускорением понимают увеличение скорости реакции без внешнего стимулирования. Процессы горения и взрыва сопровождаются выделением тепла и света. Именно такое прогрессирующее самоускорение химического процесса осуществляется во всех режимах и формах развивающегося горения: в воспламенении, распространении пламени, во взрыве и в детонации.

Известно, что ламинарное распространение пламени представляет собой послышное воспламенение горючей смеси, вызванное тем, что тепло и активные промежуточные продукты из горячей зоны поступают в прилегающий слой свежей горючей смеси путем тепло- и массопереноса и создают в этом слое условие воспламенения [3–6]. В отличие от воспламенения в режиме взрыва горение протекает настолько интенсивно, что происходит скачкообразный рост давления в ограниченном объеме непосредственно в зоне горения, и скорость продвижения фронта разрыва давления и температуры в среде может превышать скорость звука. Детонация же представляет собой распространяющийся в пространстве с постоянной скоростью комплекс химической реакции, протекающей в режиме взрыва, и вызванной ею мощной ударной волны, которая в свою очередь вызывает взрывную реакцию в прилегающем слое свежей смеси [3–10]. Управление всеми этими широко распространенными процессами, играющими важную роль в различных областях человеческой деятельности, требует выяснения и учета специфики каждого из этих режимов.

Горение может быть вызвано двумя разными факторами. Одним из них является положительная обратная связь между скоростью реакции и повышением температуры за счет выделившегося тепла. Воспламенение, вызванное этим фактором и называемое тепловым, реализуется, если тепловыделение от химической реакции превалирует над теплоотводом, и при этом с повышением температуры скорость тепловыделения увеличивается больше, чем возрастает скорость теплоотвода [3–6]:

$$q^+ \geq q_-; \quad (1)$$

$$dq^+ / dT \geq dq_- / dT. \quad (2)$$

Здесь q^+ – скорость тепловыделения, т.е. количество тепла, выделившегося в единицу времени в единице объема. Эта величина равна произведению теплового эффекта и скорости реакции;

q_- – скорость теплоотвода из системы;

T – температура.

В традиционной теории теплового горения химический процесс представляют в виде одностадийной реакции, т.е. в виде процесса, в котором продукт получается непосредственно из исходных реагентов. Соответственно скорость реакции, например, второго кинетического порядка представляют в виде:

$$-d[B]/dt = W = k^o [A][B] \exp(-E/RT), \quad (3)$$

где $[A]$, $[B]$ – концентрации исходных молекулярных реагентов;

t – время;

k^o – предэкспоненциальный множитель константы скорости;

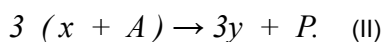
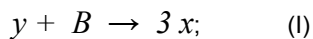
E – энергия активации.

Обычно принимается первый кинетический порядок реакции.

Поскольку концентрации исходных реагентов в ходе одностадийных процессов монотонно падают, то саморазогрев в таких реакциях является единственным фактором, определяющим самоускорение реакций горения. Поэтому тепловая теория объясняет явления горения только с позиций тепловыделения и теплоотвода [4–6, 10].

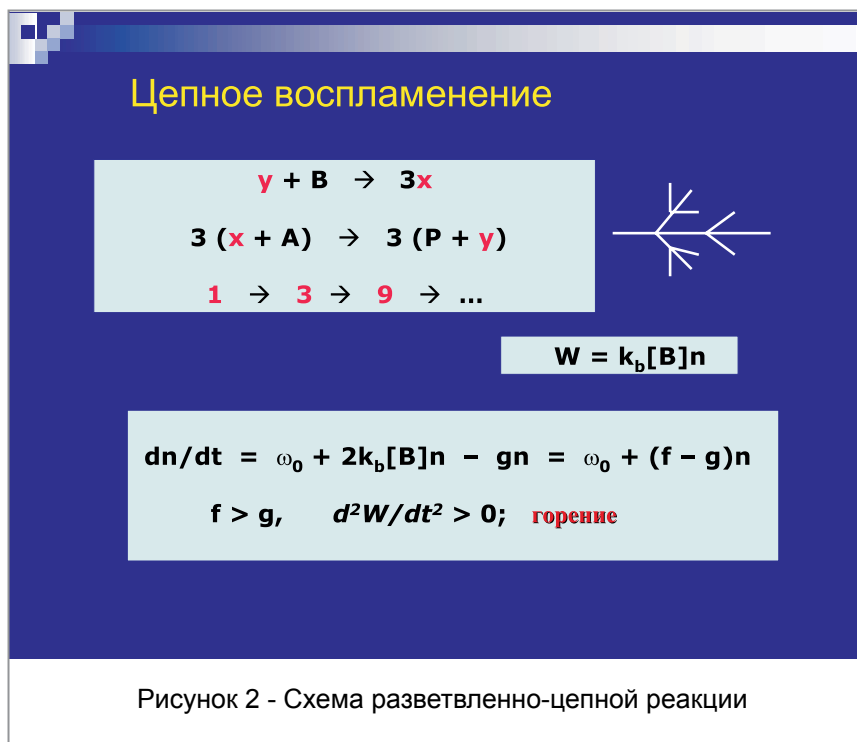
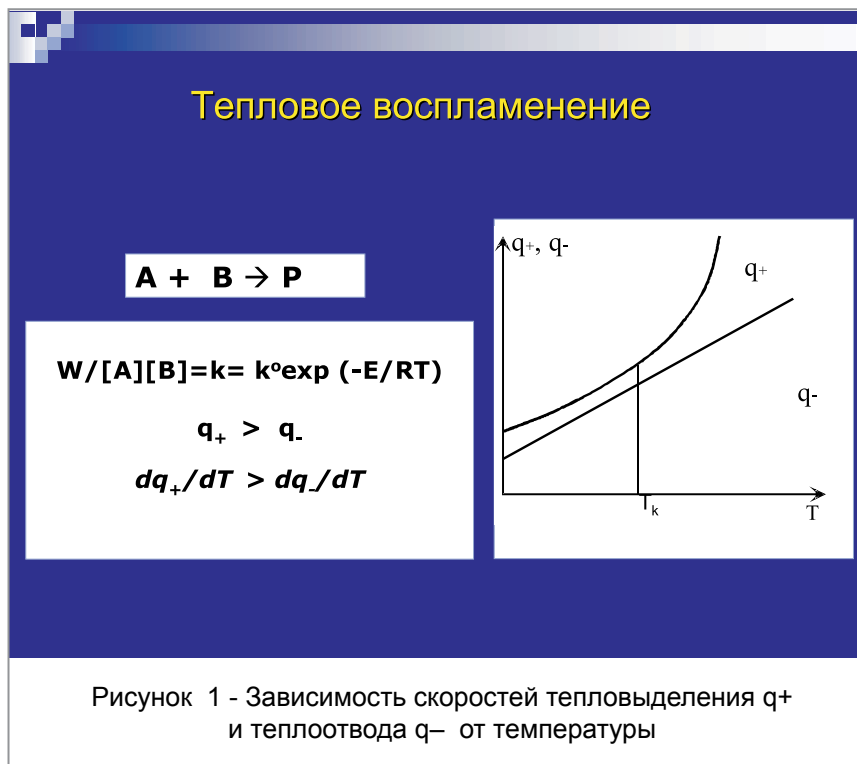
На рисунке 1 приведена зависимость скоростей тепловыделения q_+ и теплоотвода q_- от температуры для условий, когда $q_+ > q_-$, т.е. для условий саморазогрева реакционной системы [3]. Из рисунка видно также, что с повышением температуры выше определенного критического значения T_k скорость тепловыделения возрастает сильнее, чем скорость теплоотвода, т.е. выше этой температуры реализуется рассмотренное условие теплового воспламенения.

После открытия академиком Н.Н. Семеновым разветвленно-цепных процессов стал известным также принципиально другой фактор, приводящий к воспламенению [7]. Это – лавинообразное размножение активных промежуточных продуктов – осколков молекул, т.е. свободных атомов и радикалов в их многократно повторяющихся реакциях, образующих реакционные цепи:



В этой схеме x , y – свободные атомы и радикалы – активные промежуточные частицы, являющиеся носителями цепей; A и B – исходные молекулярные реагенты; P – конечный продукт.

Из этой схемы видно, что вновь образующиеся, чередующиеся актив-



ные частицы, реагируя с исходными веществами, начинают новые ветви реакционных цепей и, таким образом, при размножении этих частиц реакционная цепь разветвляется, как это схематически изображено на рисунке 2.

Примером такого типа процессов является горение водорода. В ходе развития этого процесса периодически чередуются следующие реакции регенерирующихся и размножающихся атомов H , O и радикалов OH :



Наряду с регенерацией и размножением активные частицы вступают также в реакции гибели, т.е. реагируют с образованием малоактивных частиц, например, рекомбинируют или вступают в такие реакции и реагируют с молекулами определенного типа, в результате которых образуются малоактивные частицы. Примером реакций последнего типа в начальных стадиях горения является образование радикала HO_2 , значительно менее активного в горении водорода, чем атомы H , O и радикал OH :



где M – любая третья частица, отбирающая избыток энергии, выделяющейся при соединении атома H с молекулой O_2 [3].

Изменению концентрации n активных частиц во времени, вызванному химической реакцией, соответствует уравнение:

$$dn/dt = \omega_o + (f-g)n = \omega_o + \varphi n. \quad (4)$$

В этом выражении f и g – скорости размножения и гибели активных частиц при единичной их концентрации; ω_o – скорость образования активных частиц в реакциях только исходных молекулярных реагентов между собой.

Очевидно, что в условиях, при которых скорость размножения атомов и радикалов превалирует над их гибелью, их концентрация возрастает, причем в геометрической прогрессии. Это видно также из выражения (4), когда реализуется неравенство:

$$f > g, \quad (5)$$

величина n прогрессивно (т.е. в геометрической прогрессии) возрастает.

Скорость расходования исходного реагента в разветвленно-цепном процессе (РЦП) равна:

$$W = -d[B]/dt = \omega_o + k_b n [B], \quad (6)$$

где t – время;

n и $[B]$ – концентрация НЦ и исходного реагента соответственно;

ω_o – скорость зарождения цепей, т.е. образования НЦ в реакциях только исходных молекул;

k_b – эффективная константа скорости лимитирующей стадии процесса [3].

Очевидно, что с прогрессивным размножением атомов и радикалов, реагирующих с исходными молекулярными реагентами, прогрессивно возрастает также скорость расходования этих исходных веществ. Это следует также из выражения (6): при прогрессирующем увеличении n концентрации активных частиц также прогрессивно возрастет скорость процесса W .

Из приведенного выше определения явления горения видно, что бурно самоускоряющийся цепной процесс, вызванный лавинообразным размножением активных частиц, также является горением. В этом случае саморазогрев реакционной смеси не является необходимым. Однако тепловыделение, сопровождающее быструю экзотермическую реакцию, приводит к повышению температуры, т.е. к саморазогреву системы, что дополнительно ускоряет цепное горение.

Благодаря большой реакционной способности атомов и радикалов и их высоким концентрациям в цепном горении исходные реагенты расходуются практически только в реакциях с этими активными промежуточными частицами, т.е. в самой цепной реакции. Специальные измерения показывают, что в пламени молекулярный кислород расходуется

с атомарным водородом в тысячи раз быстрее, чем с молекулярным водородом. Аналогично молекулы горючего расходятся с атомарным кислородом и радикалами *ОН* несравненно быстрее, чем в реакциях между собой, поэтому закономерности горения определяются практически только цепным механизмом.

Определяющая роль цепной лавины в горении и взрыве газов в условиях, важных для практики

Длительное время было общепринятым считать, что в газозависимых процессах горения цепной механизм играет важную роль только при давлениях в десятки и сотни раз ниже атмосферного давления, фактически при отсутствии саморазогрева. Горение же при более высоких давлениях считалось результатом только саморазогрева. Так, в фундаментальной монографии Н.Н. Семенова [3] о третьем предельном давлении водорода с кислородом, как раз относящемся к атмосферному давлению и повышенным давлениям, говорится:

«Прекрасное согласие между расчетом и опытом не оставляет сомнения в том, что третий предел смесей водорода с кислородом имеет тепловую природу». И в последующих своих работах [8, 9] автор считает цепными пределами только два нижних предела, которые в десятки и сотни раз ниже атмосферного давления. Такая же интерпретация воспламенения водорода и других газов при атмосферном давлении приведена в других монографиях, например, в [6], в курсах химической кинетики и физической химии. В широко известной монографии [10] утверждается: «Разветвленные цепные реакции не так уж часто встречаются; к тому

же при температурах горения выше 1000°C, которые существуют даже в пламенах разбавленных водород-кислородных смесей, тепловое самоускорение реакции значительно превышает ускорение, связанное с развитием разветвленных цепей. В так называемых горячих пламенах, с которыми обычно приходится иметь дело на практике, самоускорение происходит тепловым, а не цепным путем».

В ряде статей по численному моделированию процессов горения при атмосферном давлении рассматриваются кинетические схемы, включающие и стадии реакционных цепей. Но при этом роль разветвления не исследовалась или воспламенение интерпретировалось как не цепной, а тепловой взрыв. Даже в настоящее время встречаются статьи, в которых утверждается, что воспламенение и горение в области атмосферного давления имеет не цепной характер, а является лишь тепловым взрывом. Анализ некоторых из таких статей приведен в работах [11–14].

В большой серии наших экспериментальных и теоретических исследований, в том числе в [15–18], вопреки сложившимся представлениям, было установлено, что разветвленно-цепной характер реакции в процессах горения большинства газов является определяющим не только при крайне низких давлениях, но также при любых более высоких давлениях, важных для практики. Было показано также, что цепная лавина является определяющим фактором также в процессах взрыва и детонации. В определенных условиях одновременно с цепной лавиной прогрессирующий характер приобретает саморазогрев, и тогда процесс протекает при одновременной реализации двух лавинных процессов:

прогрессирующего размножения активных частиц и лавинообразного накопления тепловой энергии в системе. Это – тепловой взрыв, но с разветвленно-цепным механизмом.

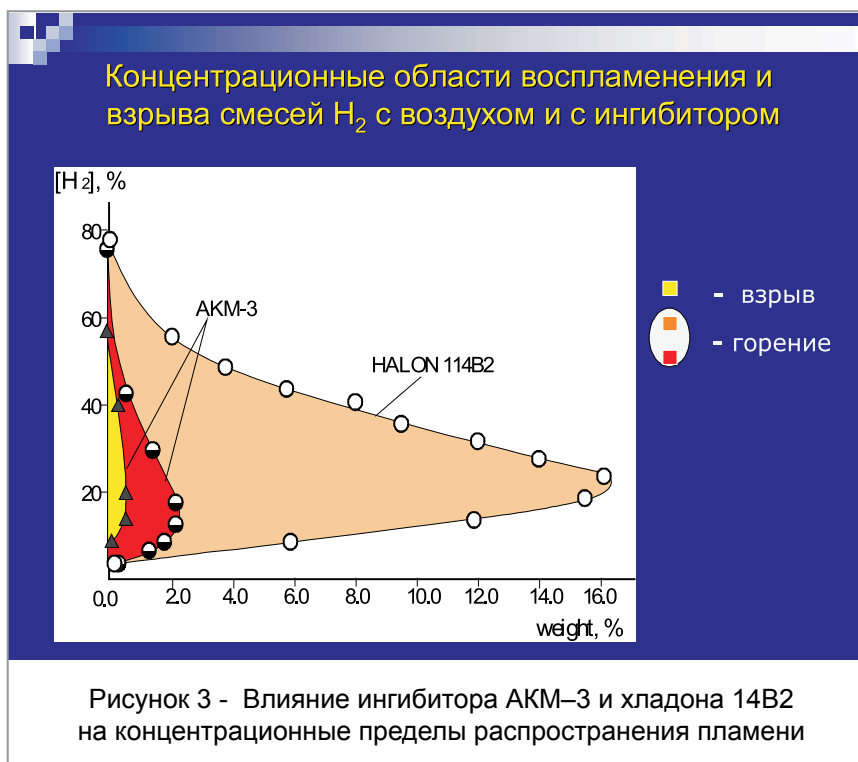
Ингибирование горения

В исследованиях, направленных на выяснение роли цепной лавины в различных режимах горения, наряду с другими методами широко использовалось явление ингибирования, т.е. подавления химического процесса малыми присадками специально подобранных веществ. Малые присадки этих веществ предотвращают воспламенение и взрыв. Присадки настолько малы, что их действие невозможно объяснить разбавлением смеси. Например, 2 % ингибитора (изобутена) предотвращает воспламенение и взрыв смеси 40 % водорода с воздухом, в то время, как количество азота, необходимое для предотвращения воспламенения указанной смеси водорода с воздухом, превышает 50 % [10]. Очевидно, что если бы исходное горючее и окислитель реагировали непосредственно между собой, то малые присадки не могли бы сколько-нибудь значительно влиять на скорость горения и тем более не были бы способны предотвратить воспламенение, взрыв и детонацию. Предотвращение горения ингибитором показывает, что горение протекает не путем непосредственной реакции молекул исходного окислителя и горючего между собой, а по такому механизму, в котором исходные молекулярные реакции реагируют с химически очень активными промежуточными частицами, которые в этих реакциях размножаются и, значит, еще быстрее расходуют исходные вещества. В пламени водорода, углеводородов и ряда других горючих газов при атмосферном давлении зареги-

стрированы значительные концентрации атомов и радикалов по их спектрам. Высокие концентрации этих частиц, большая реакционная способность обеспечивают протекание горения по цепному пути при любых давлениях.

Влияние же ингибиторов вызвано тем, что они эффективно реагируют с активными промежуточными частицами - с атомами и радикалами, приводя к образованию малоактивных продуктов. В результате таких реакций ингибиторов тормозится лавинное размножение активных частиц, блокируется цепной путь горения, являющийся, как было сказано выше, фактически единственным путем горения. Поэтому процесс в целом подавляется.

Выявление определяющей роли цепной лавины в горении и взрыве газов при атмосферном давлении и повышенных давлениях указало на возможность и актуальность разработки эффективных методов химического управления всеми режимами этих процессов: воспламенением, взрывом, распространением пламени и детонацией. Наш подход основан на разрабатываемой теории неизотермических цепных процессов, являющейся развитием теории Н.Н. Семенова. Тип ингибитора и эффект ингибирования зависят от характера горючего, от химического механизма и теплового эффекта горения. Молекулы углеводородов, являющихся горючими веществами, сами частично участвуют в обрыве реакционных цепей. Поэтому концентрационные пределы распространения их пламени значительно уже соответствующих пределов водорода или синтез-газа. Вместе с тем при горении углеводородов тепла выделяется значительно больше, чем и обусловлена более трудная ингиби-



руемость горения этих веществ. Многочисленные и разного типа эксперименты в хорошем согласии с выводами из теории показали, что даже очень небольшое варьирование соотношения скоростей разветвления и обрыва реакционных цепей с помощью ингибиторов приводит к сильному изменению всех характеристик горения и в том числе его интенсивности. При этом если ингибитор ускоряет суммарный обрыв цепей настолько сильно, что разветвление оказывается медленнее обрыва, то горение и, значит, взрыв и детонация становятся невозможными. Если же, несмотря на ускорение под воздействием ингибитора обрыва цепей, разветвление все же остается быстрее, то горение протекает, но с меньшей интенсивностью. В результате этого сильно затрудняется или становится невозможным переход горения к взрыву и детонации. Таким образом, даже если ингибитор не полностью предотвращает горение, например, в результате очень малого его количества, он устраняет взрыв и дето-

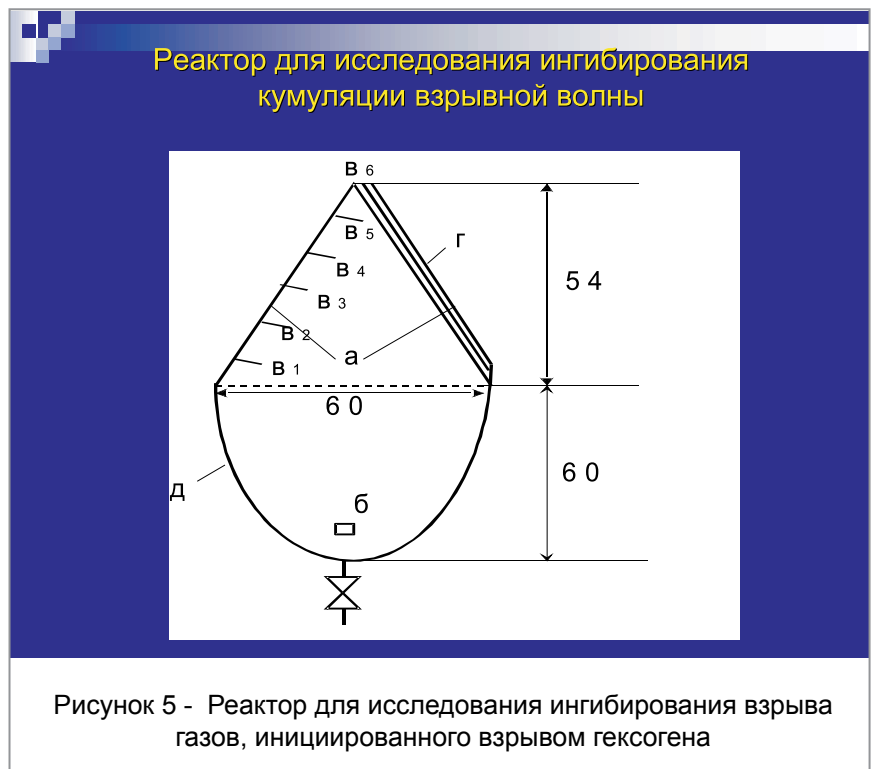
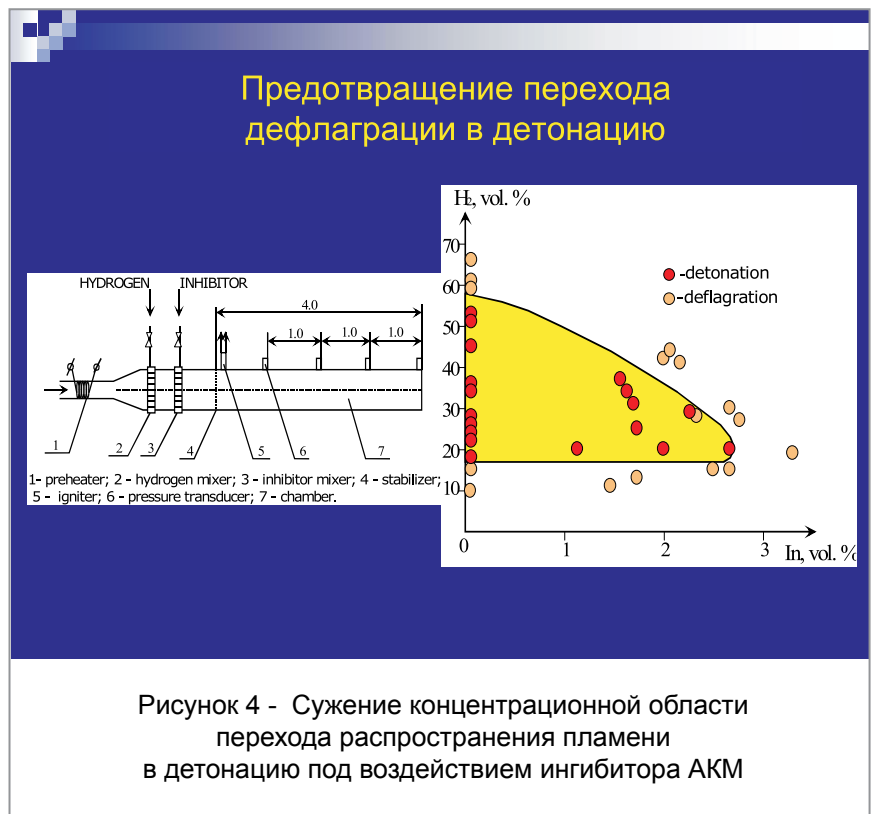
нацию, тем самым предотвращая присущее этим режимам горения разрушающее действие.

К настоящему времени предложены и при участии соответствующих межведомственных комиссий на примерах окисления водорода, синтез-газа и метана испытаны эффективные методы и присадки, позволяющие регулировать характеристики этих процессов в условиях, важных для практики, в том числе предотвратить возгорание, взрыв и детонацию. Химический состав используемых нами ингибиторов и процедура их использования определяются характером горючих газов и конкретной задачей регулирования характеристик горения, взрыва и детонации, в том числе предотвращения этих процессов. Сужение концентрационной области воспламенения и распространения пламени водородо-воздушных смесей под воздействием одного из предложенных нами ингибиторов иллюстрирует рисунок 3, где для сравнения приведено также влия-

ние хладона. Узкая область вблизи оси ординат, окрашенная желтым цветом, – область цепно-теплого взрыва, которая является необходимым условием перехода горения в детонацию.

Эксперименты подтверждают также вывод теории о том, что для предотвращения взрыва и детонации ингибитора требуется меньше, чем для предотвращения воспламенения. Это используется для обеспечения стабильного горения без его перехода во взрыв и детонацию. Например, как показано сотрудниками Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН (ИСМАН РАН) совместно с сотрудниками Московского авиационного института (МАИ) в защищенном патентом методе, для устранения взрыва в двигателе внутреннего сгорания (режима «стука») требуется лишь около 1% ингибитора. Приведенные же на рисунке 4 данные, полученные совместно с Центральным институтом авиационного моторостроения (ЦИАМ), показывают, что для обеспечения стабильного горения водорода в условиях работы прямоточного воздушно-реактивного двигателя, т.е. для предотвращения перехода распространения пламени в детонацию в горючих смесях любого состава, эффективным является ингибитор АКМ, объемная доля которого составляет 2,6%.

Специальные исследования показали, что управление интенсивностью горения и его полное подавление с помощью ингибиторов осуществляются при любом источнике зажигания, включая взрыв гексогена в горючем газе и иницирование сильной детонационной волной. В качестве примера на рисунках 5 и 6 приведены схема конического реактора и результа-



ты предотвращения взрыва и регулирование его интенсивности при иницировании взрывом гексогена в условиях кумуляции. Видно, что при добавках ингибито-

ра более 2% взрыва водорода не происходит. Варьирование же количества ингибитора в интервале от 0 до 1,7% позволяет управлять интенсивностью взрыва. Голубые и

розовые точки на кривых соответствуют экспериментам, в которых создавался заданный рост давления при взрыве путем использования предсказанного необходимого количества ингибитора.

Разработанные методы ингибирования позволяют также регулировать характеристики детонационных волн, в том числе предотвратить детонацию при любой интенсивности инициирования и разрушить уже оформившуюся стационарную детонационную волну на заданном расстоянии от места ее возникновения.

На рисунке 7 приведена фотография стенда с ударными трубами и регистрирующей аппаратурой.

На рисунке 8 представлены $x-t$ диаграммы детонационных (1, 2) и ударных (3) волн, а также фронтов горения в отсутствие и при наличии ингибитора. Видно, что в присутствии ингибитора детонационная волна распадается на ударную волну и на все больше отстающий от него фронт горения, в результате чего ударная волна замедляется и затухает. Отметим, что традиционная теория детонации, рассматривающая одностадийную химическую реакцию, ингибирование детонации не предусматривала. Для эффективного подавления горючих газовых смесей во всем диапазоне горючих составов были испытаны комбинированные ингибирующие смеси. Радикальное сужение концентрационной области воспламенения и горения смесей водорода и метана с воздухом под воздействием таких ингибиторов иллюстрируется результатами, полученными совместно с Г.Р. Сайковой (рисунки 9, 10). Для сравнения показано также влияние инертных газов.

Управление взрывом в кумуляции

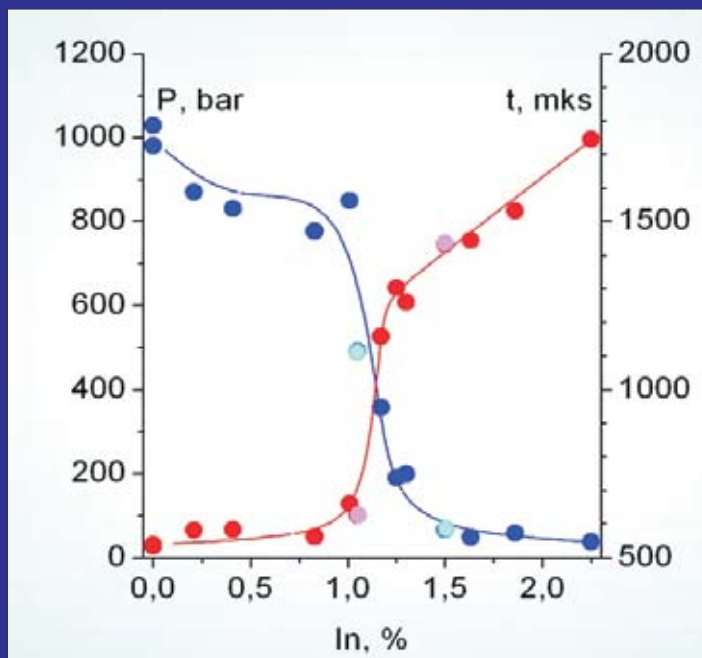


Рисунок 6 - Зависимость максимального давления взрыва водородо-воздушной смеси и кинетики его развития от содержания ингибитора при инициировании взрывом гексогена

Стенд исследования детонации



Рисунок 7 - Экспериментальный стенд для изучения ингибирования детонации

Предложенный нами ингибитор, позволяющий предотвратить взрыв метановоздушных смесей, прошел успешные испытания перед межведомственными комиссиями, включающими в свой состав представителей от Ростехнадзора, МЧС и угольной промышленности. Аналогичные результаты получены при испытании ингибирования взрыва метана в штреке при инициировании взрывом детонита в количестве 200 г. В присутствии представителей Концерна Росэнергоатом, МЧС и некоторых АЭС, входящих в состав межведомственных комиссий, также успешно прошли испытания предложенные нами ингибиторы, предотвращающие воспламенение, взрыв и детонацию водородо-воздушных смесей.

Как в шахтах, так и на АЭС есть помещения, в которых образуются взрывоопасные концентрации горючего газа. Катастрофы в шахтах широко известны, несмотря на принимаемые меры предосторожности. Используемые в АЭС каталитические окислители водорода, как это показала авария на АЭС «Фукусима-1», далеко не всегда эффективны.

Из изложенного выше следует, что взрывы на АЭС можно предотвратить, если в помещение с реактором и в помещение бассейна выдержки ввести небольшое количество ингибитора. Расчеты хорошо согласуются с экспериментальными данными и показывают, что расслоения ингибитора во взрывоопасной среде практически не происходит, даже если бы не было диффузии. Весьма перспективно применение водорода с ингибитором также в летательных аппаратах с легким наполнителем – в аэростатах, дирижаблях и зондах, все шире используемых в различных областях техники. В настоящее время

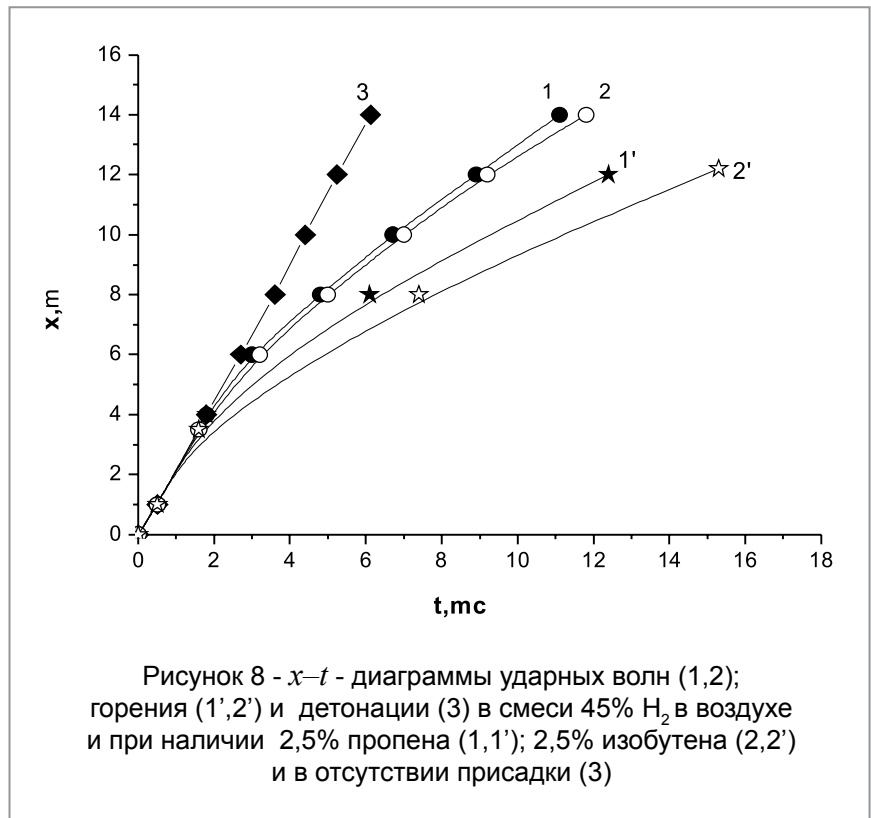


Рисунок 8 - $x-t$ - диаграммы ударных волн (1,2); горения (1',2') и детонации (3) в смеси 45% H_2 в воздухе и при наличии 2,5% пропена (1,1'); 2,5% изобутена (2,2') и в отсутствии присадки (3)

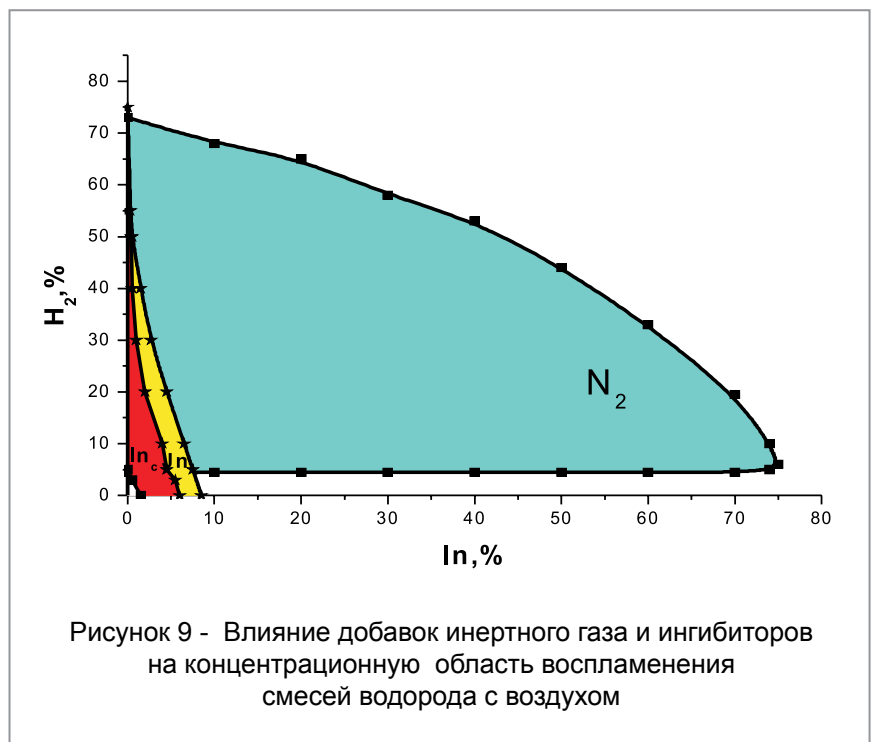


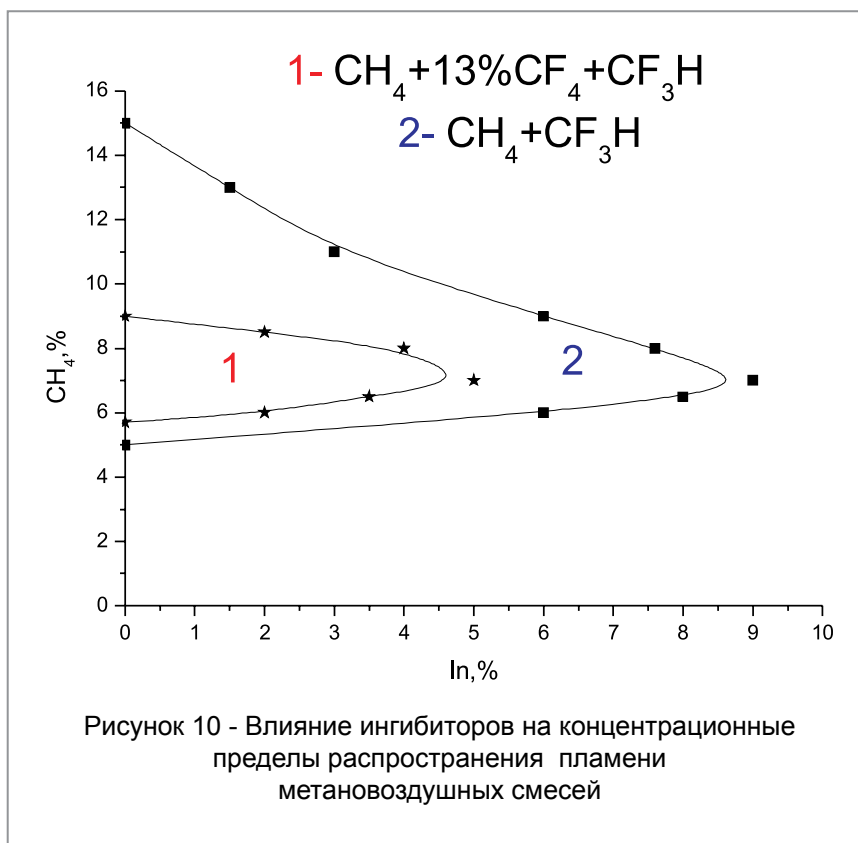
Рисунок 9 - Влияние добавок инертного газа и ингибиторов на концентрационную область воспламенения смесей водорода с воздухом

в качестве легкого наполнителя используют гелий, который менее доступен и намного дороже водорода. Нами предложены неконденсирующиеся даже при $-50^{\circ}C$ ингибиторы,

добавки которых в количестве от 2 до 3 % обеспечивают взрывобезопасность водорода в летательном аппарате. После успешных испытаний, проведенных совместно с

МАИ, возможность использования ингибитора в этих целях подтверждена сертификатом МЧС.

Таким образом, к настоящему времени разработаны химические методы и средства для управления горением, взрывом и детонацией водорода, метана и синтез-газа, в том числе радикального уменьшения опасности их возгорания, взрывов и детонации в различных производствах, при хранении, транспортировке и применении. Разработанный подход к управлению различными режимами горения позволяет предотвратить детонацию в каналах, а также разрушить стационарную детонационную волну на заданном расстоянии от места ее возникновения.



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Баратов, А.Н. Пожарная безопасность / А.Н. Баратов, В.А. Пчелинцев. - М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 1997. - 171 с.
- 2 Progress in Astronaut. and Aeronaut. / Borisov, A.A., Kosenkov V.V., Maikov A.E. [at al.]. - Ser. AIAA, 1993. - V. 153. - P. 312-315.
- 3 Семенов, Н.Н. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности / Н.Н. Семенов. - М.: Изд-во АН СССР, 1958. - 686 с.
- 4 Франк-Каменецкий, Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д.А. Франк-Каменецкий. - М.: Наука, 1987. - 491 с.
- 5 Вильямс, Ф. Теория горения / Ф. Вильямс. - М.: Наука, 1971. - 615 с. (Williams F. Combustion Theory. University of California, 1964).
- 6 Математическая теория горения / Я.Б. Зельдович, Г.И. Баренблат, В.Б. Либрович, Г.М. Махвиладзе. - М.: Наука, 1980. - 478 с.
- 7 Семенов, Н.Н. Цепные реакции / Н.Н. Семенов. - Л.: Госхимтехиздат, 1934. - 555 с.
- 8 Семенов, Н.Н. Развитие теории цепных реакций и теплового воспламенения / Н.Н. Семенов. - М.: Знание, 1969. - 95 с.
- 9 Семенов, Н.Н. Цепные реакции / Н.Н. Семенов // Большая советская энциклопедия. - М.: Советская энциклопедия, 1978. - Т. 28. - С. 533.
- 10 Льюис, Б. Горение, взрывы и пламя в газах / Б. Льюис, Г. Эльбе. - М.: Мир, 1968. - 604 с.
- 11 Азатян, В.В. Разветвленно-цепная природа горения водорода при атмосферном давлении / В.В. Азатян, А.Г. Мержанов // Химическая физика. - 2008. - Т. 27. - № 11. - С. 93-96.
- 12 Невозможность теплового взрыва гремучей смеси без цепной лавины / В.В. Азатян, Д.И. Бакланов, И.А. Болодьян [и др.] // Кинетика и катализ. - 2009. - Т. 50. - № 2. - С. 176-181.
- 13 Ингибирование различных режимов горения водорода в воздухе пропиленом и изопропиловым спиртом / В.В. Азатян, А.А. Борисов, А.Г. Мержанов [и др.] // Физика горения и взрыва. - 2005. - Т. 41. - № 1. - С. 3-14.
- 14 Роль конкуренции реакций продолжения и обрыва цепей в процессах горения / В.В. Азатян, И.А. Болодьян,

Ю.Н. Шебеко, В.Ю. Навценя // Пожарная безопасность. - 2009. - № 1. - С.1–10.

15 Об изотермическом самовоспламенении водорода на третьем пределе / Л.Д. Петрова, В.В. Азатян, А.Н. Баратов, З.И. Каганова // Горение и взрыв. -М.: Наука, 1977. - С. 526–528.

16 Азатян, В.В. Концентрационные пределы распространения пламени и химия горения смесей оксид углерода – кислород – азот / В.В. Азатян, Н.В. Андреева, А.И. Эльнатанов // Химическая физика. - 1988. - Т. 7. - № 6. - С. 821–826.

17 Доминирующая роль конкуренции разветвления и обрыва реакционных цепей в формировании концентрационных пределов распространения пламени / В.В. Азатян, Ю.Н. Шебеко, И.А. Болодьян, В.Ю. Навценя // Журнал физической химии. - 2002. -Т. 76. -№ 5. -С. 775–784.

18 Azatyan, V.V. Suppression of Detonations by Efficient Inhibitors. Gaseous and Heterogeneous Detonations / V.V. Azatyan, G.Gg.Wagner, G.K. Vedeshkin. -М.: ENAS Publishers, 1999. - P. 331– 336.

EFFICIENT CHEMICAL METHODS TO CONTROL BURNING, EXPLOSION AND GAS DETONATION

V.V. Azatian, T.R. Timerbulatov, S.V. Shatirov

Theoretical grounds and chemical methods to control burning, explosion and detonation of hydrogen, methane and synthetic gas, including radical danger decrease of their burning, explosion and detonation in different industry branches during their storage, transportation and usage are shown. An approach is developed to control different burning modes to prevent detonation in the channels and also to break the stationary detonation wave at a given distance from the spot of it's origin.

Key words: CHEMICAL METHODS, CONTROL, BURNING PROCESS, EXPLOSION, GAS DETONATION, INHIBITOR, GAS MIXTURE SUPPRESSION, OXIDATION

Азатян
Вилен Вагаршович
e-mail: azatyan@ism.ac.ru

Тимербулатов
Тимур Рафкатович

Шатилов
Сергей Владимирович