

## ДИСКУССИЯ

УДК 614.841.12+541.128 [546.21+541.11]+621/43.019.2

О СУЩЕСТВОВАНИИ КРИТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ  
ЦЕПНО-ТЕПЛООВОГО ВЗРЫВА В ПЛАМЕНАХ

В. А. Бунев, В. В. Замашников

Институт химической кинетики и горения СО РАН, 630090 Новосибирск, bunev@kinetics.nsc.ru

Обсуждается реальность существования двух кинетических режимов и критических условий цепно-теплового взрыва при волновом распространении пламени по смесям водород — воздух и метан — воздух. Показано, что экспериментальные данные не подтверждают реальность двух кинетических режимов. Имеют место два режима сгорания горючих смесей в условиях замкнутого сосуда в гравитационном поле, не связанные с кинетическими особенностями.

Ключевые слова: цепно-тепловой взрыв, кинетический режим, распространение пламени, конвективный предел.

В работе [1] рассмотрен вопрос о критических условиях цепно-теплового взрыва водородовоздушных и метановоздушных смесей. Основные выводы авторов сделаны на основе обработки экспериментальных данных по максимальному росту давлений  $\Delta p_{\max}$ , развивающихся в закрытых сосудах при сгорании горючей смеси. Процесс инициируется источником зажигания — нагретым телом или искрой. В работе приведена зависимость  $\Delta p_{\max}$  от состава смеси, который меняется от бедного до богатого предела распространения пламени. Эта зависимость имеет некоторые особенности, которые авторы [1] использовали для обоснования наличия двух кинетических режимов горения как в смесях водород — воздух, так и в смесях метан — воздух. Сделан вывод о том, что наличие двух различных кинетических режимов горения невозможно объяснить без учета ведущей роли цепного механизма. Обоснование существования двух кинетических режимов протекания реакции в условиях распространения пламени принципиально важно. Оно требует всестороннего обсуждения. В работе [1] имеются спорные места и не рассмотрены другие варианты интерпретации полученных экспериментальных данных.

В данной работе предлагается иная интерпретация экспериментальных данных [1]. Она не связана с кинетическими особенностями, о которых говорится в [1], и основана на представлениях о конвективном пределе распро-

странения пламени [2].

Следует отметить, что в [1] интерпретация экспериментальных данных основывается на утверждении [3] о том, что распространение пламени представляет собой послышное воспламенение (самовоспламенение), происходящее по мере передачи тепла из горячей зоны в соседний, пока еще не реагирующий слой. Поэтому терминология, принятая в [1], соответствует описанию явлений самовоспламенения (гомогенных газовых реакций), не связанных с волновым процессом распространения пламени. Считается, что воспламенение происходит при нагреве газа от более горячих слоев фронта пламени. Такое представление о механизме распространения пламени не очевидно. Против него свидетельствуют, например, данные о том, что химически активные добавки по-разному действуют на процессы самовоспламенения и распространения пламени. В [4] приведены данные Бартоломе и Закса, указывающие на то, что активные добавки, существенно влияющие на самовоспламенение горючих смесей, практически не влияют на нормальную скорость распространения пламени. В работе [5] отмечалось, что в процессе поиска добавок, влияющих на нормальную скорость распространения пламени водорода или углеводородов, не удалось обнаружить ни одного вещества, промотирующего горение, хотя такие химически активные добавки — промоторы — не редкость для процесса самовоспламенения.

Авторы работы [6] пришли к выводу, что при рассмотрении распространения пламени необходимо принимать во внимание теплопроводность, учитывать диффузию исходных компонентов, промежуточных частиц с короткой продолжительностью жизни, ввести зависимость скорости реакции от температуры и состава и избегать неопределенного понятия «температура воспламенения». Все это говорит о том, что механизм самовоспламенения и механизм воспламенения от фронта пламени различны. И различие возникает за счет наличия во фронте пламени градиентов температуры и концентраций исходных компонентов, активных центров, продуктов горения, а также диффузионных потоков. Наличие диффузионного потока активных центров приводит к тому, что изменение их концентрации в какой-то точке фронта не может описываться уравнением (5) из [1]

$$\frac{dn}{dt} = \omega_0 + (f - g)n + k_+ n^2.$$

Здесь  $\omega_0$  — скорость зарождения цепей в реакциях, протекающих при участии только исходных реагентов;  $k_+$  — эффективная константа скорости разветвления при взаимодействии активных частиц между собой;  $f$  и  $g$  — скорости соответственно линейного разветвления и обрыва цепей при единичной концентрации  $n$  носителей цепей. В действительности для пламени надо наряду с уравнением теплопроводности записывать уравнения диффузии для каждого компонента исходной смеси, продуктов реакции и промежуточных частиц, в том числе и для активных центров. В соответствии с этими уравнениями изменение концентрации активных центров по координате фронта пламени определяется не только кинетикой, но и процессами переноса: конвективным  $\left(\rho u \frac{dn}{dx}\right)$  и диффузионным  $\left(\frac{d}{dx} \rho D \frac{dn}{dx}\right)$  [4, 5]. Здесь  $\rho$  — плотность,  $u$  — нормальная скорость пламени,  $D$  — коэффициент диффузии активного центра  $n$ ,  $x$  — координата фронта пламени. Поскольку в [1] процессы переноса не учитываются, то использование уравнения, предложенного в [1], даст результат, не соответствующий волновому процессу распространения пламени.

Далее, поскольку в [1] распространение пламени рассматривается как послонное воспламенение, то предполагаемое в этой рабо-

те наличие двух кинетических режимов протекания реакции должно однозначно привести к тому, что на кривой зависимости нормальной скорости распространения пламени от состава будет иметь место скачок при концентрациях водорода или метана, соответствующих границе цепно-теплого взрыва по [1]. Такого скачка нормальной скорости в экспериментах не обнаружено. Температура пламени также не меняется скачком при изменении концентрации водорода в диапазоне  $15 \div 25$  %, поскольку это чисто термодинамическая величина. Нормальная скорость пламени также не претерпевает скачка в указанном диапазоне — это экспериментальный факт. Все это свидетельствует о том, что в диапазоне концентраций водорода  $15 \div 25$  % нет критических условий для цепных разветвленных реакций, имеющих место в фронте пламени. Данный вывод справедлив и для богатых смесей в диапазоне концентраций водорода  $50 \div 65$  %. Соответственно, нет оснований для вывода о наличии двух кинетических режимов в условиях волнового распространения пламени в смесях водород — воздух и метан — воздух.

Волновой процесс сгорания горючей газовой водородовоздушной смеси возможен в двух режимах: дефлаграционном в диапазоне концентраций водорода  $5 \div 75$  % с максимальной нормальной скоростью около 3 м/с и детонационном в более узком диапазоне концентраций. Реализация того или иного режима зависит от способа иницирования. Не очевидно, что при зажигании смеси нагретой спиралью в цилиндрическом сосуде в [1] процесс сгорания происходил в детонационном режиме. По данным [1, 3, 7–9] можно оценить характерные скорости распространения волны. В [3, с. 222] утверждается, что время достижения максимального давления может составлять  $1 \div 2$  мкс. Поскольку время достижения максимального давления известно и учитывая, что в [1, 3] горение инициируется источником зажигания у нижнего торца цилиндрического сосуда длиной 25 см, получим оценку скорости волны горения, распространяющейся по этому сосуду снизу вверх:  $125 \div 250$  км/с. Так как скорость детонации составляет несколько километров в секунду, то, вероятно, в [3] допущена опечатка в значении времени достижения максимального давления в сосуде. Время сгорания, по-видимому, на три-четыре порядка больше. Не зная точного времени достижения максимального давле-

ния в замкнутом цилиндрическом сосуде, нельзя получить и характерную скорость. Поэтому на основании полученной оценки нельзя определить, с каким процессом, дефлаграционным или детонационным, авторы [1] имеют дело. Ответ на этот вопрос можно было бы получить из не приведенной в [1] записи давления — время. Резкий звук не является достаточным признаком детонационного процесса, так же как и значение  $\Delta p_{\max}$ . Резкий звук, или стук, сопровождающий сгорание газа после инициирования горения в замкнутом объеме, иногда возникает в результате самовоспламенения смеси перед фронтом пламени. Но в этом случае смесь перед фронтом не «саморазогревается», а нагревается за счет адиабатического сжатия. Критические условия, разделяющие два кинетических режима, о которых говорится в [1], в принципе, могут достигаться во время адиабатического сжатия свежей смеси перед фронтом пламени, но не за счет саморазогрева. И наличие такого самовоспламенения перед фронтом пламени (стук) надо экспериментально подтвердить. Примеры подобных экспериментов приведены в [5]. Резкий звук появляется, когда характерное время процесса близко к характерному времени собственных колебаний оболочки экспериментального сосуда. А максимальное значение  $\Delta p_{\max}$  для стехиометрических смесей практически для всех горючих газов и жидкостей составляет  $0,6 \div 0,7$  МПа [10].

Если рассматривать распространение пламени как послышное самовоспламенение, то непонятно, почему для концентрации водорода 18 % в [1] максимальный «саморазогрев» равен 300 К. Такое утверждение соответствует тому, что по смеси распространяется волна горения с максимальной температурой во фронте пламени 600 К. Однако известно [11], что температура пламени смеси 18 % водорода с воздухом равна 1700 К. Она получена экспериментально и расчетным путем. Это и есть максимальный саморазогрев указанной смеси. При увеличении концентрации водорода в смеси с воздухом максимальный саморазогрев (в терминах [1]) будет еще выше. И он имеет место только во фронте пламени. В продуктах сгорания при наличии теплопотерь температура может быть уже другой. Естественно, давление в замкнутом сосуде обусловлено средней температурой заключенного в нем газа, однако ничего не известно о распределении температуры по пространству при наличии

волны горения. При зажигании смеси внизу цилиндрического или в центре сферического сосуда в какой-то момент времени будет наблюдаться неоднородное распределение температуры по пространству. В продуктах сразу за фронтом горения температура будет высокой, в свежей смеси перед фронтом — немного выше начальной за счет адиабатического сжатия, а в охлажденных продуктах — какие-то промежуточные значения. Авторам работы [1], не зная значений температур, концентраций и координаты фронта пламени, где достигаются критические условия, приходится искать их, оценивая температуру по величине  $\Delta p_{\max}$ , а концентрации исходных компонентов брать начальными. Как видно из изложенного выше, такой подход представляется неверным.

В [1] нет конкретных данных о том, что при концентрациях водорода  $\approx 19$  и  $\approx 55$  % выполняется условие (8а) ( $f = g$ ), которое, по мнению авторов, является условием перехода с одного режима на другой. Авторы приводят только качественные рассуждения о тенденциях при изменении того или иного параметра, но не дают конкретных примеров смены знака в условии  $f \geq g$ . Эти рассуждения, возможно, применимы для условий самовоспламенения в отсутствие градиентов параметров, при адиабатическом нагреве (не при саморазогреве за счет реакции) смеси перед фронтом пламени при его распространении в замкнутом сосуде.

Далее, величина  $\Delta p_{\max}$  в [1] служит показателем скорости реакции. На самом деле,  $\Delta p_{\max}$  — величина чисто термодинамическая и не может служить мерилем скорости или интенсивности реакции. Она зависит только от того, сколько химической энергии заключено в исходной смеси, сколько тепла потеряют (в стенки сосуда) продукты реакции за время превращения химической энергии в тепловую и насколько полно произойдет это превращение. В сферическом замкнутом сосуде при центральном зажигании, когда пламя распространяется в виде сферической волны, равноудаленной от стенок сосуда, давление достигает максимально возможного значения. При нецентральной зажигании сферическая волна не равноудалена от стенок. Поэтому ближайшая к стенкам сосуда точка волны первой коснется стенок. Когда это произойдет, пламя уже не будет сферическим. Часть фронта пламени исчезнет, а продукты сгорания начнут охлаждаться. Соответственно, прирост давления бу-

дет меньше максимального  $\Delta p_{\max}$ . На записи давление — время появляется излом, связанный с уменьшением массовой скорости сгорания. Поэтому чем дальше источник зажигания находится от центра сферического сосуда, тем меньше будет конечное давление при прочих равных условиях. Степень выгорания также будет зависеть от места расположения источника зажигания. Эти данные приведены в работе [2], в которой исследовались роль свободной конвекции на пламена в околопредельных смесях и ее влияние на распространение пламени по сосуду.

Вследствие неопределенности понятия «саморазогрев в условиях волнового процесса» в работе [1] появилась оценка максимального саморазогрева  $\Delta T$ , соответствующая приросту давления в сосуде после завершения сгорания (полного или неполного). Эта оценка дает среднее значение температуры газа в этом сосуде. На самом деле, температура в сосуде изменяется — от начальной до температуры горения (даже в том случае, когда прирост давления вблизи пределов не очень большой и может сопровождаться неполным выгоранием). Низкие значения  $\Delta p_{\max}$  вблизи пределов обусловлены только большой степенью недогорания, когда к верхней стенке сосуда поднимается маленький очаг пламени, растекается по этой поверхности и гаснет. Переход от больших степеней выгорания к низким происходит в узком диапазоне концентраций. Поэтому такой резкий переход в [2] был назван конвективным пределом. В [2] приведены конкретные примеры такого резкого перехода для смесей водород — воздух, бутан — воздух с экспериментальным доказательством того, что при резком переходе резко меняются условия распространения пламени вниз. Например, при концентрации бутана 6,1 % в смеси с воздухом пламя не может распространяться вниз, оно распространяется только вверх. В смесях с 6,0 % бутана пламя распространяется как вверх, так и вниз. Величина  $\Delta p_{\max}$  при таком изменении концентрации бутана также претерпевает резкий скачок. Для бедных смесей водород — воздух по данным [2] скачок происходит при концентрации водорода  $\approx 8$  %. При концентрациях ниже 8 % пламя распространяется только вверх, при более высоких — и вверх, и вниз. Концентрация топлива, при которой происходит скачок, зависит от формы и размеров

сосуда, от расположения точки зажигания. В условиях невесомости, когда гравитационная конвекция отсутствует, зависимость  $\Delta p_{\max}$  от состава будет отличаться от полученной в [1].

В работе [7] приведены данные, которые авторы рассматривают как доказательство наличия двух кинетических режимов. Наличие скачка в интенсивности горения (по [7] это величина  $\Delta p_{\max}$ ) при уменьшении содержания ингибитора в горючей газовой смеси является, как считают авторы этой работы, другим проявлением зависимости критических условий цепно-теплового взрыва от состава смеси. При увеличении концентрации добавленного ингибитора в смеси водород — воздух величина  $\Delta p_{\max}$  линейно уменьшается. Однако при некоторой концентрации ингибитора значение  $\Delta p_{\max}$  резко уменьшается, но не до нуля. Эту концентрацию авторы называют границей области цепно-теплового взрыва. Переход процесса из одного кинетического режима в другой происходит скачкообразно. Как считают авторы работы [7], в одном из режимов процесс протекает без теплового взрыва, хотя и сопровождается значительным саморазогревом, в другом — реализуется тепловой взрыв. Однако, как показывают многочисленные экспериментальные данные по влиянию ингибиторов на процесс, нормальная скорость распространения пламени уменьшается с увеличением концентрации ингибитора без каких-либо скачков. Только при определенных значениях концентрации ингибитора на зависимости давление — время в замкнутом сосуде появляется характерный излом, указывающий на то, что скорость пламени достаточно мала и начинает сказываться влияние гравитационной конвекции. В этом случае авторы [7] также приходят к неверному утверждению о наличии критических условий для цепно-теплового взрыва в условиях волнового процесса.

При рассмотрении вопроса о влиянии мощности инициирования в [1] анализируются результаты опытов с маломощным источником в цилиндрическом сосуде при нижнем поджигании и с более мощным — в сферическом сосуде при центральном поджигании. При этом поджигание производится разнотипными источниками (нагретой спиралью и искрой). Следует отметить, что возможные последствия влияния гравитационной конвекции в этих сосудах будут различными. Нагретая спираль не является точечным источником: при зажи-

гании образуется сразу большой очаг пламени. При искровом зажигании (практически точечным источником) сразу образуется существенно меньший очаг пламени. Гравитационная конвекция оказывает сложное влияние на горение газов в замкнутом объеме. Она вызывает подъем очага пламени к верхней стенке сосуда. Неспособность пламени распространяться по всему объему под влиянием конвекции может наблюдаться при изменении различных параметров. К ним могут относиться состав смеси, давление, перегрузки, ингибиторы. Конвекция начинает сказываться, когда видимая скорость пламени меньше скорости конвекции. Условие отсутствия влияния конвекции приведено в ГОСТ'e 12.1.044-89 «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов». Оно заключается в том, что при определении нормальной скорости пламени число Фруда  $Fr = S_s^2/ad$  должно быть больше 0,11. В этом случае конвекция в сосуде не успевает развиться, т. е. очаг пламени не всплывает и не деформируется. Это условие ГОСТ'a для пренебрежения влиянием конвекции. Здесь  $S_s$  — видимая скорость пламени, м/с;  $a$  — ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $d$  — диаметр сосуда, м. Конвекцией можно пренебречь либо при больших значениях видимой скорости, либо в сосуде малого диаметра. Если число Фруда меньше 0,11, то конвекция успеет развиться. В этом случае максимальное давление взрыва в сосуде будет зависеть и от условий зажигания, и от условий развития очага пламени. По оценке по ГОСТ'у для сосуда, используемого в [1], конвекцией можно пренебречь, если видимая скорость пламени больше 30 см/с. С другой стороны, из работы [1] следует, что в околопредельных бедных смесях водород — воздух нормальная скорость распространения пламени зависит от мощности инициирования волны горения, поскольку чем мощнее источник зажигания, тем больше прирост давления. В действительности же нормальная скорость пламени не зависит от мощности источника зажигания.

Используя условие (8а), авторы [1] объясняют узость концентрационной области распространения пламени в смесях метан — воздух тем, что величина  $g$  при окислении метана больше. Однако более узкие области для метана вызваны не этим. Во-первых, стехиометрические составы для метана — 9,5 % об., для водорода — 29,6 %. Во-вторых, максимум нормальной скорости распространения пламени у

метана достигается при объемном содержании  $\approx 9,5$  %, у водорода — около 42 %. В-третьих, авторы [1], когда говорят о разной мольной теплоте сгорания метана и водорода, не учитывают того факта, что тепло выделяется при реакции горючего с кислородом. На окисление моля водорода требуется половина моля кислорода, в то время как на окисление моля метана требуется два моля кислорода. Поэтому, по оценкам с использованием данных по теплотам сгорания [11], на один моль кислорода выделяется примерно одно и то же количество тепла и для метана (400 кДж), и для водорода (480 кДж). Соответственно, узость области распространения пламени в богатых смесях метан — воздух не обусловлена большим значением  $g$  для метана по сравнению с водородом.

В [1] выражено удивление, что в работах по численному решению систем уравнений, описывающих горение газов, наличие двух режимов не было продемонстрировано даже после ранних публикаций авторов [1], сообщающих об обнаружении цепно-теплового взрыва в экспериментах и расчетным путем. Следует отметить, что в цитированных в [1] работах нет экспериментальных доказательств цепно-теплового взрыва. В них дана только интерпретация имеющихся экспериментальных данных. Однако экспериментальные данные [1, 3, 7–9] могут иметь более простое и более естественное объяснение, связанное с влиянием гравитационной конвекции на горение газовой смеси в условиях замкнутого сосуда. Закономерности, связанные с конвективным пределом, известны давно [2]. В рамках представлений о влиянии гравитационной конвекции на процесс сгорания в замкнутом сосуде понятны существенная неполнота выгорания и различие данных для цилиндрического и сферического сосудов. При использовании ГОСТ'a 12.1.044-89 для интерпретации экспериментальных данных можно прийти к выводу, что в богатой околопредельной области в смесях водород — воздух конвекция не играет роли. Это связано с тем, что нормальная скорость пламени для смесей с концентрацией водорода 50 ÷ 75 % выше 1 м/с [6] и число Фруда много больше критического значения 0,11. Соответственно, в зависимости  $\Delta p_{\max}$  от состава в богатой области для водорода не должно быть скачка, связанного с влиянием гравитационной конвекции.

На основании единственной точки ( $[H_2] = 60$  %), расположенной между значениями  $[H_2]$

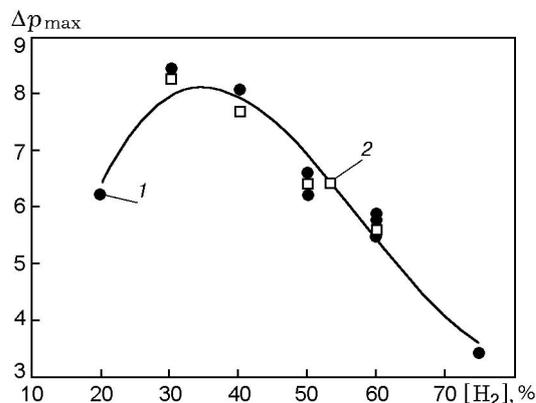


Рис. 1. Зависимость прироста давления от объемной концентрации водорода:

$p_0 = 0,3$  МПа,  $T_0 = 20$  °С; смеси: 1 — водород — воздух, 2 — водород — 0,2 % пропана — воздух

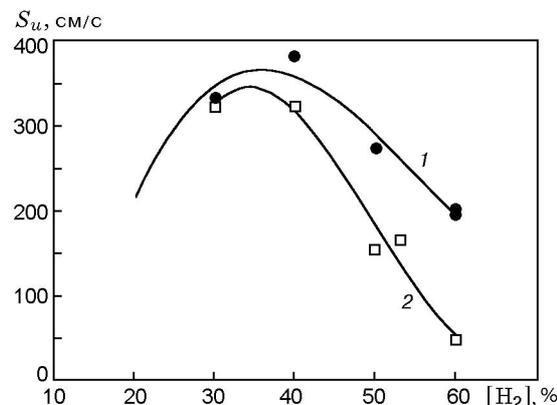


Рис. 2. Зависимость нормальной скорости распространения пламени от объемной концентрации водорода:

$p_0 = 0,3$  МПа,  $T_0 = 20$  °С; смеси: 1 — водород — воздух, 2 — водород — 0,2 % пропана — воздух

50 и 74 %, как это сделано в [1], рискованно утверждать наличие скачка в этой области. Необходимо тщательнее изучить этот диапазон концентраций. На рис. 1 и 2 представлены полученные в настоящей работе по ГОСТ'у 12.1.044-89 максимальные давления взрыва и нормальные скорости распространения пламени для смесей водород — воздух и водород — 0,2 % об. пропана — воздух. Из рисунков видно, что на кривых зависимостей  $\Delta p_{\max} = (p_{\max} - p_0)/p_0$  и нормальной скорости  $S_u$  от концентрации водорода в диапазоне  $[H_2] = 50 \div 60$  % никакого скачка нет. Пропан является ингибитором для смесей водород — воздух, т. е. уменьшает нормальную скорость пламени. При этом роль конвекции должна увеличиться, однако даже в этом случае максимальный прирост давления не испытывает скачка в указанном диапазоне концентраций водорода (см. рис. 1). В бедных околопредельных смесях резкое увеличение  $\Delta p_{\max}$  при увеличении концентрации водорода в [1] экспериментально подтверждено. Однако определить значение числа Фруда для этих смесей невозможно, поскольку для указанного диапазона концентраций нет надежных данных по нормальным скоростям распространения пламени. Влияние конвекции можно определить по записям давление — время: если на записях имеется излом, то влияние очевидно. Что касается смесей метан — воздух, то нормальные скорости вблизи пределов равны примерно  $5 \div 10$  см/с и число Фруда может достигать критического значения. Поэтому влияние конвекции на величину  $\Delta p_{\max}$  вб-

лизи пределов распространения пламени в смесях метан — воздух очевидно [2]. Отметим, что в многочисленных работах по численному моделированию процессов горения не зарегистрировано двух кинетических режимов. Экспериментально же показано, что существуют два режима сгорания в замкнутом сосуде в условиях влияния гравитационного поля.

Таким образом, выводы в [1, 3, 7–9] о наличии двух режимов цепного горения в волновом процессе распространения пламени по смесям водород — воздух и метан — воздух не обоснованы. Причиной недоразумения является некорректное перенесение понятий, связанных с процессом самовоспламенения, на волновой процесс. Само перенесение понятий вызвано представлением о том, что волновой процесс распространения пламени происходит по механизму послойного самовоспламенения. Этот механизм не нашел экспериментального подтверждения. Напротив, многочисленные данные противоречат такому представлению. Особенности зависимости  $\Delta p_{\max}$  от состава в работе [1] могут быть объяснены проявлениями гравитационной конвекции, возникающей в замкнутом сосуде в околопредельной области концентраций. В области богатых смесей с водородом указанная в [1] особенность экспериментально не подтверждается. Существуют два режима сгорания газовых смесей в замкнутом сосуде в гравитационном поле. И эти режимы не связаны с кинетическими особенностями.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Азатян В. В., Болодьян И. А., Шебеко Ю. Н., Копылов С. Н.** Особенности критических условий цепно-теплового взрыва // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37, № 5. С. 12–23.
2. **Lovachev L. A., Babkin V. S., Bunev V. A., et al.** Flammability limits: An invited review // Combust. Flame. 1973. V. 20. P. 255–289.
3. **Денисов Е. Т., Азатян В. В.** Ингибирование цепных реакций. Черногловка, 1997.
4. **Кондратьев В. Н.** Кинетика химических газовых реакций. М.: Изд-во АН СССР, 1958.
5. **Соколик А. С.** Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. М.: Изд-во АН СССР, 1960.
6. **Иост В.** Взрывы и горение в газах. М.: Изд-во иностр. лит., 1952.
7. **Азатян В. В.** Особенности неизотермических разветвленно-цепных реакций и новые аспекты теории // Кинетика и катализ. 1999. Т. 40, № 6. С. 818–834.
8. **Азатян В. В., Айвазян Р. Г., Калачев В. И. и др.** Различные кинетические режимы горения водорода в области третьего предела воспламенения и роль разветвления цепей // Хим. физика. 1998. Т. 17, № 2. С. 117–126.
9. **Азатян В. В., Мержанов А. Г.** Цепно-тепловой взрыв и его особенности // Химическая физика на пороге XXI века. М.: Наука, 1996. С. 74.
10. **Пожаровзрывоопасность** веществ и материалов и средства их тушения: Справочник / Под ред. А. Н. Баратова. М.: Химия, 1990.
11. **Drell I. L. and Belles F. E.** Survey of Hydrogen Combustion properties. Report 1383. Lewis Flight Propulsion Laboratory. Cleveland, Ohio, 1958.

*Поступила в редакцию 29/IV 2002 г.*

---