

МИНИМАЛЬНАЯ УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОВАЯ МОЩНОСТЬ ЗАЖИГАНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ КАК КРИТЕРИЙ ИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К ТЕПЛОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ

В. Ф. Проскудин, П. Г. Бережко, В. В. Ярошенко, А. А. Селезнев,
А. С. Буланников, Е. Н. Беляев

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров

На примере водородовоздушной смеси показано, что минимальная удельная тепловая мощность зажигания газовых смесей мостиком накаливания может быть использована в качестве удобного критерия чувствительности таких смесей к тепловому воздействию в условиях, когда источник тепла имеет малые размеры, а процесс нагрева «растянут» во времени.

Теория воспламенения горючих газовых смесей и взрывчатых веществ (ВВ) разработана достаточно подробно [1–3]. На практике их чувствительность к тепловому воздействию характеризуют обычно или температурой воспламенения, или минимальной энергией зажигания. Это относится, в частности, и к горючим газовым смесям, содержащим водород [2–7]. Однако в ряде случаев трудно воспользоваться этими критериями. Так, температурой воспламенения удобно пользоваться при больших временах процесса нагрева (от десятков миллисекунд до нескольких секунд) и при больших характерных размерах источника тепла (более нескольких миллиметров). Но если размеры источника тепла малы (не более десятков микрометров), этот критерий уже мало пригоден из-за сильной зависимости температуры воспламенения от размеров источника тепла [4, 5]. Минимальной энергией зажигания удобно оперировать в случае достаточно малых размеров источника тепла, но при этом и время нагрева должно быть мало (менее десятой доли миллисекунды).

Вместе с тем довольно часто возникает необходимость в таком критерии, которым было бы удобно пользоваться при решении задач, где источник тепла имеет малые размеры (менее нескольких десятков микрометров), а процесс нагрева «растянут» во времени от десятков миллисекунд до нескольких секунд (и более). Подобные задачи могут возникать, например, при анализе сценариев тяжелых аварий на АЭС, когда в атмосфере защитной оболочки станции образуется взрывоопасная смесь, в которую из разрушенной активной зоны ядерного

реактора могут забрасываться мелкие раскаленные частички и различные аэрозоли, постоянно подогреваемые мощным излучением коридора [8]. Близкие по физическому содержанию задачи могут возникать и при решении проблемы минимизации мощности источника тепла калильного типа для активных и пассивных воспламенителей газовых смесей водорода с воздухом и водяным паром, а также при оптимизации параметров каталитических дожигателей водорода.

В качестве критерия, характеризующего чувствительность газовых смесей к тепловому воздействию, вероятно, можно использовать минимальную удельную мощность зажигания смесей мостиком накаливания. Под удельной мощностью здесь понимается скорость выделения джоулевого тепла на единицу длины мостика (W_l , Вт/см). Известно, что минимальная удельная мощность зажигания ВВ мостиками накаливания практически не зависит от диаметра мостика при достаточно малом его значении ($10 \div 50$ мкм), являясь, по существу, функцией только кинетических констант и теплофизических параметров иницируемого вещества [9]. Есть основания ожидать, что аналогичная закономерность будет наблюдаться и для горючих газовых смесей. Если эта закономерность выполняется, то минимальную удельную мощность зажигания можно будет использовать в качестве критерия чувствительности газовых смесей к тепловому воздействию.

Для обоснования этого вывода были выполнены специальные эксперименты. В опытах использовали водородовоздушную газовую

смесь, содержащую 30 % (по объему) водорода и 70 % атмосферного воздуха. Начальное давление смеси 10^5 Па. Мостик накаливания представлял собой нихромовую (Х20Н80) проволочку, закрепленную с помощью пайки свинцово-оловянным припоем между двумя цилиндрическими электродами диаметром 2 мм. Мостик располагался горизонтально внутри цилиндрической камеры с плоскими торцами. Внутренняя полость камеры имела диаметр 35 мм и длину 335 мм. Материал электродов и камеры — нержавеющая сталь. Внутренние стенки камеры не имели никакого специального покрытия, и состояние их поверхности соответствовало чистовой обработке резцом на токарном станке. Мостик накаливания внутри камеры располагался таким образом, чтобы наиболее нагретая средняя его часть всегда находилась на оси камеры на расстоянии не менее ≈ 15 мм от одного из торцов. Диаметр мостиков изменялся в диапазоне $10 \div 300$ мкм, при этом отношение длины мостика к диаметру было не менее 150. Ток I выбирали таким, чтобы можно было ожидать как воспламенения, так и невоспламенения смеси. В опытах определяли значение тока $I_{ign,0,5}$, при котором воспламенение происходило с вероятностью 0,5. Это значение тока использовали для расчета минимальной удельной мощности зажигания газовой смеси мостиком накаливания:

$$W_{l,ign} = RI_{ign,0,5}^2/L, \quad (1)$$

где R — электрическое сопротивление нагретого мостика, L — длина мостика накаливания.

В опытах также определяли время задержки воспламенения (τ_{ign}), измеряемое от момента начала пропускания электрического тока по мостик накаливания до момента воспламенения смеси. Момент воспламенения регистрировали с помощью двух разнесенных в пространстве терморезисторных датчиков (один был расположен на расстоянии ≈ 5 мм, а другой — на расстоянии ≈ 120 мм от мостика накаливания). Датчики представляли собой вольфрамовые проволочки диаметром 20 мкм и длиной 3 мм. При зажигании газовой смеси непрерывно измерялось электрическое сопротивление датчиков, что позволяло регистрировать момент прихода фронта горения смеси к датчикам по резкому увеличению их электрического сопротивления.

Значение тока, протекающего по мостик накаливания, и сигналы, поступающие с

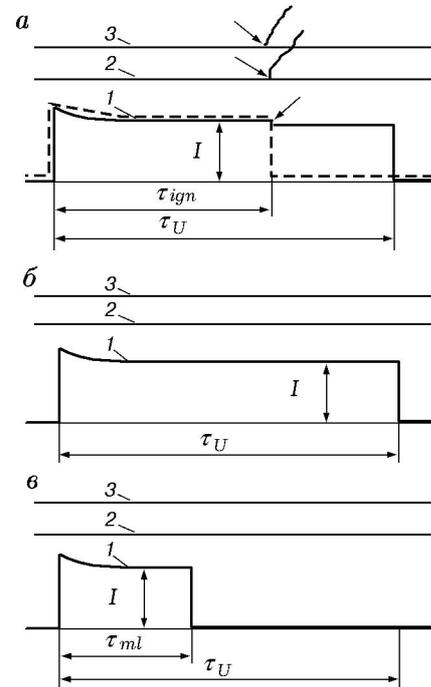


Рис. 1. Осциллограммы тока, проходящего по мостик накаливания (1), и сигналов с терморезисторных датчиков (2, 3) в случае загорания смеси при диаметре мостика $d \leq 30$ мкм (штриховая линия) и $d \geq 60$ мкм (сплошная линия) (а), а также в случае отказов первого рода (б) и второго рода (в) при диаметре мостика 10 мкм:

стрелками показан момент загорания смеси

терморезисторных датчиков, регистрировали шлейфовым осциллографом Н-117. Время, в течение которого на мостик накаливания подавали электрическое напряжение (τ_U), составляло $4 \div 5$ с. Характерные осциллограммы показаны на рис. 1. Видно, что при загорании смеси сигналы с обоих терморезисторных датчиков поступают практически одновременно (см. рис. 1,а). Следовательно, время прохождения волны горения от мостика накаливания до датчиков существенно меньше времени задержки воспламенения τ_{ign} . Поэтому значение τ_{ign} можно определять как время от начала подачи напряжения на мостик накаливания до момента появления сигналов от терморезисторных датчиков. Опыты показали, что в продуктах горения исследуемой смеси происходит резкий дополнительный нагрев мостика накаливания. Это приводит к перегоранию мостика, если его диаметр $d \leq 30$ мкм. При $d \geq 60$ мкм дополнительный разогрев мостика в продуктах горе-

ния приводит к небольшому, но резкому снижению тока, что хорошо фиксируется на осциллограммах (см. рис. 1, а). Этот эффект также можно использовать для экспериментального определения времени задержки зажигания. Полученные значения времени задержки зажигания смеси находятся в пределах от нескольких миллисекунд ($d = 10 \div 30$ мкм) до нескольких секунд ($d = 200 \div 300$ мкм).

При определении значения $I_{ign,0,5}$ с нихромовым мостиком диаметром 10 мкм наблюдали два вида отказов зажигания смеси:

а) отказы первого рода — обычное невоспламенение смеси из-за того, что выделяемая в мостике тепловая мощность меньше критической. Мостик накаливания остается целым в течение всего времени подачи на него электрического напряжения (см. рис. 1, б);

б) отказы второго рода — невоспламенение смеси из-за того, что в результате нагрева электрическим током мостик расплавляется (перегорает). Время перегорания мостика (τ_{ml}) оказывается меньше времени пропускания тока и, что особенно важно, меньше ожидаемого времени задержки зажигания (см. рис. 1, в). То есть для нихромовых мостиков диаметром $d \leq 10$ мкм для зажигания смеси необходимо выполнение условия $\tau_{ml} > \tau_{ign}$. Несоблюдение этого соотношения в силу обстоятельств стохастического характера и приводит к появлению отказов второго рода в ряде опытов.

Для мостиков накаливания диаметром $d \geq 30$ мкм отказы второго рода не наблюдались. Это можно объяснить тем, что тепловой мощности, выделяемой в мостике электрическим током $\approx I_{ign,0,5}$, недостаточно для его плавления, что исключает возможность отказов второго рода. Для более детального рассмотрения вопроса, связанного с появлением отказов второго рода, были проведены специальные опыты, в которых определялась минимальная удельная мощность плавления (перегорания) нихромовых мостиков ($W_{l,ml}$) разного диаметра, находящихся в инертной газовой смеси. Расчет значений $W_{l,ml}$ проводили по соотношению (1), где вместо $I_{ign,0,5}$ использовали величину $I_{ml,0,5}$, представляющую собой уровень электрического тока, пропускаемого по мостiku накаливания, при котором происходит перегорание последнего с вероятностью 0,5. В качестве инертной среды использовали газовую смесь, содержащую 30 % (по объему) водорода и 70 % азота, находящуюся под давлени-

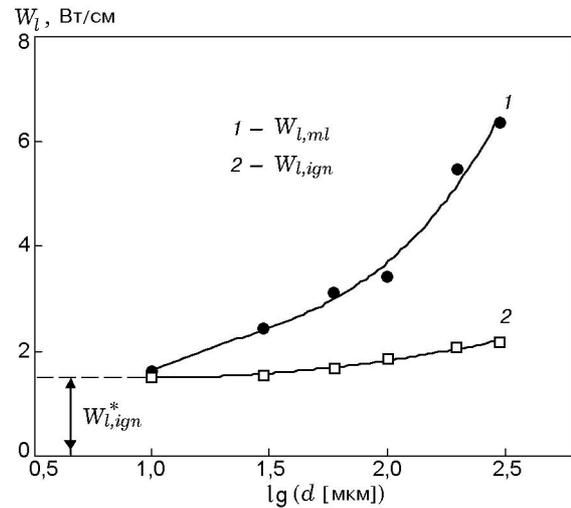


Рис. 2. Зависимость минимальной удельной мощности плавления нихромового мостика в инертной газовой смеси (1) и минимальной удельной мощности зажигания смеси (2) от диаметра мостика

ем 10^5 Па. Теплофизические и химические (восстановительные) свойства этого состава близки к свойствам рассматриваемой смеси. Замена воздуха, содержащего ≈ 78 % азота, технически чистым азотом при сохранении прежнего содержания водорода в газовой смеси не должна существенно изменить ее теплофизические свойства. Содержание водорода в инертной газовой смеси на уровне 30 % обеспечивает перегорание мостика при температуре плавления нихрома, поскольку наличие водорода в газовой смеси исключает влияние оксидной пленки на поверхности мостика на его перегорание [10].

Результаты измерений значений $W_{l,ign}$ и $W_{l,ml}$ при разных диаметрах нихромовых мостиков представлены на рис. 2. Как и ожидалось, $W_{l,ign}$ слабо зависит от диаметра мостика. По мере уменьшения диаметра мостика удельная мощность $W_{l,ign}$ незначительно снижается, приближаясь в пределе к некоторому вполне определенному значению минимальной удельной критической мощности зажигания $W_{l,ign}^*$ (в данном случае $\approx 1,5$ Вт/см). Параметр $W_{l,ign}^*$, вероятно, как раз и может служить критерием чувствительности горючих газовых смесей к тепловому воздействию при малых характерных размерах источника тепла и при «растянутом» во времени процессе нагрева. Этот параметр довольно просто определяется экстраполяцией в область $d \rightarrow 0$ значе-

ний $W_{l,ign}$, полученных при диаметрах мостика из диапазона $10 \div 100$ мкм. В первом приближении этот параметр находится еще проще — измерением $W_{l,ign}$ при каком-либо одном значении диаметра мостика, не превышающем ≈ 100 мкм. При этом истинное значение $W_{l,ign}^*$ будет меньше экспериментального значения $W_{l,ign}$ не более чем на $\approx 20\%$ (кривая 2 на рис. 2).

В отличие от $W_{l,ign}$ параметр $W_{l,ml}$ существенно зависит от диаметра мостика (зависимость 1 на рис. 2). Очевидно, что кривой 1 на рис. 2 соответствует постоянная максимальная температура разогрева мостика накаливания, а именно температура плавления нихрома Х20Н80 (1673 К [11]), при которой нихромовые мостики, нагреваемые в восстановительной среде, перегорают [10].

При диаметре нихромового мостика 10 мкм практически $W_{l,ml} \approx W_{l,ign}$. Отсюда следует, что для зажигания горючей смеси мостиком накаливания диаметром $d \approx 10$ мкм необходим его нагрев до температуры, близкой к температуре плавления нихрома (1673 К). Этот факт объясняет появление отказов второго рода в опытах с нихромовыми мостиками диаметром 10 мкм по схеме, описанной выше.

Используя полученные экспериментальные результаты, можно рассчитать критическую температуру зажигания газовой смеси мостиками различного диаметра. Если пренебречь распределением температуры по длине, то уравнение для температуры мостика можно записать в виде

$$\langle \rho c \rangle \frac{dT}{dt} = W_V - \alpha \frac{S}{V} (T - T_0), \quad (2)$$

где $W_V = I^2 / \sigma \pi^2 r^4$, $S/V = 2/r$, $\alpha = \text{Nu}(\lambda/r)$, ρ , c — плотность и теплоемкость материала мостика, V , S — объем и площадь поверхности мостика, W_V — мощность тепловыделения в мостике при протекании через него электрического тока, α — коэффициент теплоотдачи от поверхности мостика в газовую смесь, T_0 — начальная температура газовой смеси, окружающей мостик накаливания, I — протекающий ток, σ — удельная проводимость материала мостика накаливания, r — радиус мостика, Nu — число Нуссельта, λ — коэффициент теплопроводности газовой смеси.

Проведенные оценки показали, что для рассматриваемых условий опытов тепловой поток за счет излучения Q_R существенно мень-

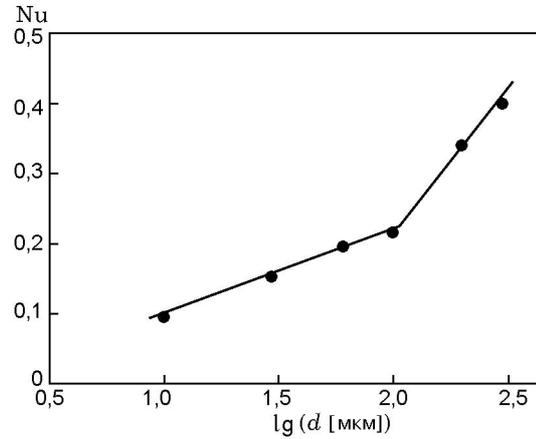


Рис. 3. Зависимость числа Нуссельта от диаметра мостика накаливания

ше, чем поток за счет теплопроводности и конвекции Q_c ($Q_R/Q_c < 0,1$). Поэтому для эффективного коэффициента теплоотдачи можно использовать выражение вида $\alpha_{eff} = \text{Nu}(\lambda/r)$.

Стационарное решение уравнения (2) имеет вид

$$T_{st} - T_0 = rW_V / 2\alpha = r^2 W_V / 2\text{Nu}\lambda. \quad (3)$$

Учитывая, что $W_V = W_l / \pi r^2$, из выражения (3) получим

$$T_{st} - T_0 = W_l / 2\pi\lambda\text{Nu}. \quad (4)$$

Используя соотношение (4) и экспериментальную зависимость 1 на рис. 2, можно рассчитать число Нуссельта для мостиков различного радиуса:

$$\text{Nu} = W(r)_{l,ml} / 2\pi\lambda(T_{ml} - T_0),$$

где $W(r)_{l,ml}$ — экспериментальное значение минимальной удельной мощности тепловыделения в мостике радиуса r , необходимой для достижения температуры плавления.

Полученная зависимость числа Нуссельта от диаметра мостика накаливания приведена на рис. 3. Излом на кривой обусловлен, вероятно, переходом от кондуктивного к конвективному механизму теплообмена между поверхностью мостика и окружающей газовой средой. Используя полученные значения числа Нуссельта и экспериментальную зависимость 2 на рис. 2, можно рассчитать минимальную температуру зажигания газовой смеси мостиками различного радиуса:

$$T(r)_{ign} - T_0 = W(r)_{l,ign} / 2\pi\lambda\text{Nu}, \quad (5)$$

где $W(r)_{l,ign}$ — экспериментальное значение минимальной удельной мощности тепловыделения, необходимой для иницирования газовой смеси мостиком радиуса r .

При известных кинетических константах химической реакции минимальную температуру зажигания можно рассчитать также, используя какой-либо теоретический критерий зажигания. Для условий локального зажигания такой критерий можно записать в виде [2]

$$\frac{2\Delta h}{\lambda} \left(\frac{r}{Nu} \right)^2 \frac{RT_{ign}^2 k}{E(T_{ign} - T_0)^2} \exp \left(- \frac{E}{RT_{ign}} \right) \geq 1. \quad (6)$$

В рассматриваемом диапазоне радиусов мостиков накаливания по критерию (6) были рассчитаны значения минимальной температуры зажигания T_{ign} . Совпадение с результатами расчетов по соотношению (5) было получено при следующих значениях формально-кинетических параметров: $E = 84$ кДж/моль, $k = 2 \cdot 10^{10}$ см³/(г·с), $\Delta h = 3,5$ кДж/г. Указанные кинетические параметры близки к тем, которые были использованы в работе [12] для расчета критической толщины газового слоя при распространении детонации в водородовоздушной газовой смеси ($E = 84$ кДж/моль, $k = 3 \cdot 10^{11}$ см³/(г·с), $\Delta h = 3,5$ кДж/г). Сопоставление значений T_{ign} , рассчитанных по соотношению (6) и по экспериментальным значениям минимальной удельной мощности зажигания (5), приведено на рис. 4. Как видно, совпадение результатов очень хорошее. Таким образом, по минимальной удельной мощности зажигания можно с удовлетворительной точностью определить минимальную температуру зажигания газовой смеси.

Для подтверждения полученных результатов были проведены специальные опыты, в которых измеряли минимальную температуру зажигания смеси нихромовым мостиком накаливания диаметром 100 мкм. В качестве датчика температуры использовали фотодиод ФД-256, предварительно откалиброванный на измерение температуры конкретного нихромового мостика. При давлении 10^5 Па в этих опытах было получено, что $T_{ign} \approx 1260$ К. Это значение в пределах ошибки измерения совпадает со значением T_{ign} , рассчитанным по минимальной удельной мощности зажигания.

Результаты экспериментов показали, что параметром $W_{l,ign}^*$ удобно характеризовать чувствительность водородовоздушной смеси к

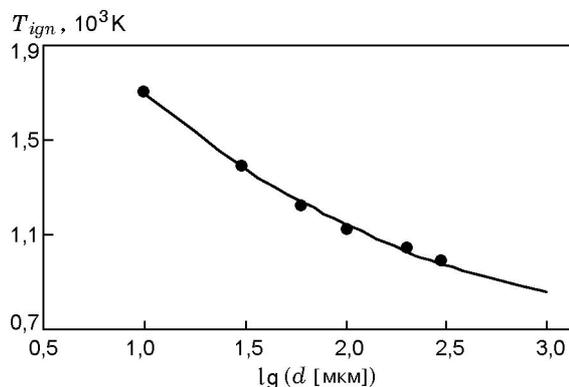


Рис. 4. Зависимость минимальной температуры зажигания смеси мостиком накаливания от его диаметра:

сплошная линия — расчет по соотношению (6), точки — по экспериментальным значениям минимальной удельной мощности зажигания

тепловому воздействию при малых характерных размерах источника тепла, а параметром T_{ign} — наоборот, при достаточно больших его размерах. Если размеры нагревателя находятся в средней части рассматриваемого диапазона (т. е. составляют, например, сотни микрометров), то, по-видимому, следует использовать оба критерия. Такой подход был применен в экспериментах по изучению чувствительности горючей смеси к тепловому воздействию при различных концентрациях водорода в газовой смеси. Начальное давление смеси составляло 10^5 Па. В качестве источника тепла был выбран нихромовый мостик диаметром 100 мкм и длиной ≈ 20 мм. В опытах одновременно измеряли ток, пропускаемый по мостику накаливания, и температуру мостика с одновременной регистрацией загорания смеси (если таковое имело место). Это позволило определить значения $W_{l,ign}$ и T_{ign} для разных концентраций водорода. По нашим оценкам, относительная погрешность измерения температуры составляла $8 \div 10$ %. Относительная погрешность измерения $W_{l,ign}$ не превышала 5 %. Результаты экспериментов, представленные на рис. 5, показывают, что изменение свойств водородовоздушной смеси (в основном теплофизических), связанное с изменением доли водорода в газовой смеси, практически не влияет на параметр T_{ign} , в то время как параметр $W_{l,ign}$ существенно зависит от содержания водорода в газовой смеси. Таким образом, параметр $W_{l,ign}$ при размере нагревателя ≈ 100 мкм (и менее)

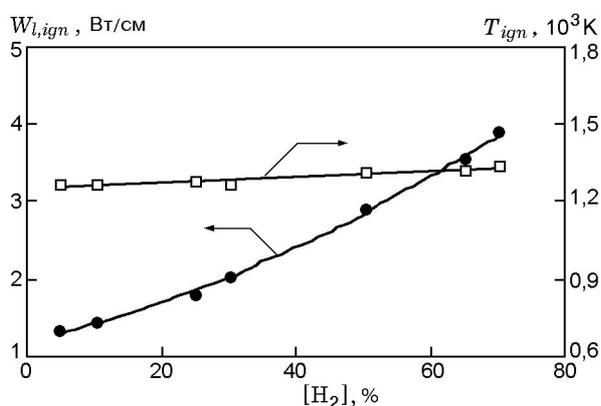


Рис. 5. Зависимость минимальной удельной мощности зажигания и температуры зажигания смеси мостиком накаливания диаметром 100 мкм от объемного содержания водорода в смеси

оказывается более чувствительным к изменению теплофизических свойств газовой смеси, чем параметр T_{ign} . Не менее важно то обстоятельство, что параметр $W_{l,ign}$ отражает свойства конкретной смеси на уровне некоторой константы, значение которой близко к $W_{l,ign}^*$ (см. рис. 2), а параметр T_{ign} подобной константой не является, поскольку его значение сильнее зависит от характерного размера источника тепла (см. рис. 2, 4).

Понятно, что для полного представления о степени относительной чувствительности водородовоздушной смеси к тепловому воздействию при длительных временах нагрева желательно иметь количественную информацию по обоим параметрам ($W_{l,ign}$ и T_{ign}) независимо от характерного размера нагревателя. Но для задач, в которых характерный размер источника зажигания водородовоздушной смеси мал (десятки микрометров), критерий $W_{l,ign}$ может оказаться предпочтительнее как по своему физическому смыслу, так и по простоте и надежности его экспериментального определения. Не исключено, что параметр $W_{l,ign}$ (или $W_{l,ign}^*$) в качестве критерия чувствительности к тепловому воздействию будет удобен и эффективен при изучении условий воспламенения и других горючих и взрывчатых газовых смесей, а также конденсированных систем.

Авторы выражают благодарность В. Н. Тараканову, В. В. Миронову, П. Е. Половинкину, В. В. Мокрушину и А. Г. Лещинской за помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б. Теория зажигания накаливаемой поверхностью // ЖЭТФ. 1939. Т. 9, № 12. С. 1530–1534; Я. Б. Зельдович. Избранные труды. Химическая физика и гидродинамика. М.: Наука, 1984. С. 220–225.
2. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1987. С. 320–358.
3. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. 2-е изд. / Пер. с англ. / Под ред. К. И. Щелкина и А. А. Борисова. М.: Мир, 1968. С. 303–304.
4. Kuchta J. M., Cato R. J., Zabetakis M. G. Comparison of hot surface and hot gas ignition temperatures // Combust. Flame. 1964. V. 8, N 4. P. 348–350.
5. Kumar R. K. Ignition of hydrogen-oxygen-diluent mixtures adjacent to a hot, nonreactive surface // Combust. Flame. 1989. V. 75, N 2. P. 197–215.
6. Maas V., Warnatz J. Ignition processes in hydrogen-oxygen mixture // Combust. Flame. 1988. V. 74, N 1. P. 53–69.
7. Пожарная безопасность. Взрывобезопасность: Справочник / Под ред. А. Н. Баратова. М.: Химия, 1987. С. 7–14.
8. Sherman M. P., Berman M. The possibility of local detonations during degraded-core accidents in the bellefonte nuclear power plant // Nuclear Technol. 1988. V. 81, N 1. P. 63–77.
9. Лобанов В. Н., Ленский Р. Г., Плотников Ю. И. и др. Расчет критических условий возбуждения детонации по тепловому механизму // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23, № 1. С. 57–60.
10. Проскудин В. Ф., Голубев В. А., Бережко П. Г. и др. Некоторые особенности перегорания мостиков накаливания в различных средах // Физика горения и взрыва. 1998. Т. 34, № 1. С. 111–116.
11. Электротехнический справочник / Под ред. В. Г. Герасимова и др. М.: Энергоатомиздат, 1985. Т. 1. С. 429.
12. Шебеко Ю. Н., Корольченко А. Я., Еременко О. Я. Расчет критической толщины газового слоя по отношению к распространению детонационной волны // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23, № 6. С. 89–91.

Поступила в редакцию 1/III 2000 г.,
в окончательном варианте — 5/V 2000 г.