

МИНИМАЛЬНАЯ УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОВАЯ МОЩНОСТЬ ЗАЖИГАНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ КАК КРИТЕРИЙ ИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К ТЕПЛОВОМУ 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 малоприменим 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 мостику 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 проволоочки 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 мостику накаливания, и сигналы, поступающие с

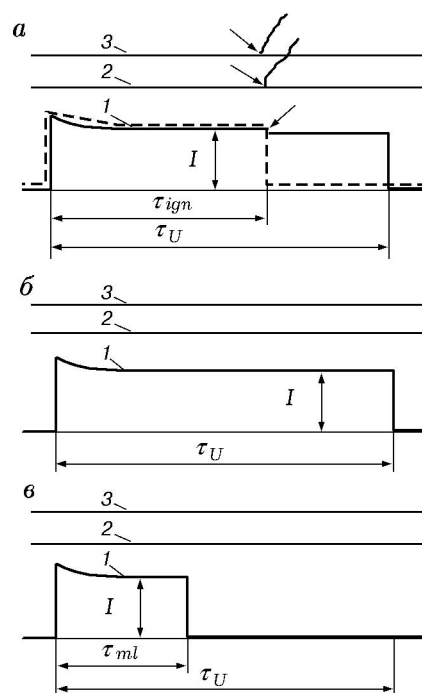


Рис. 1. Осциллограммы тока, проходящего по мостику накаливания (1), и сигналов с терморезисторных датчиков (2, 3) в случае загорания смеси при диаметре мостика $d \leq 30$ мкм (штриховая линия) (а) и $d \geq 60$ мкм (сплошная линия) (б), а также в случае отказов первого рода (б) и второго рода (в) при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

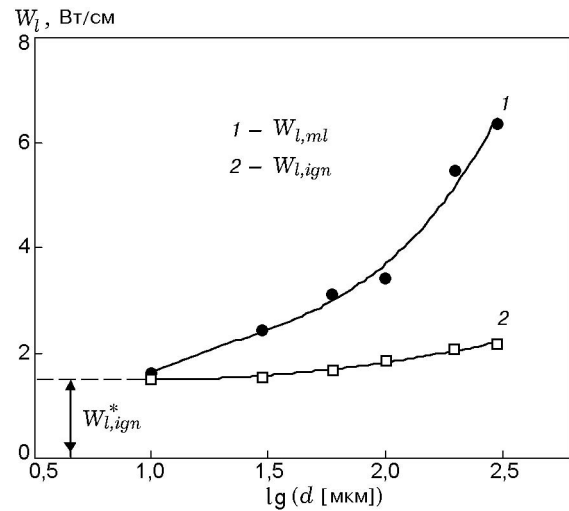


Рис. 2. Зависимость минимальной удельной мощности плавления нихромового мостика в инертной газовой смеси (1) и минимальной удельной мощности зажигания смеси (2) от диаметра мостика

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-