

УСЛОВИЯ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ВЫСОКОНАПОРНОМ ВПРЫСКЕ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ В ОГРАНИЧЕННОЕ ПРОСТРАНСТВО

В. К. Баев, А. А. Бузуков, В. В. Шумский

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск

Проведена количественная оценка температуры топливовоздушной смеси в окрестности контактного разрыва, образующегося в процессе истечения горючего газа (водород, метан, пропан) в воздух после разрыва мембраны ударной трубки. Показано, что условия, необходимые для самовоспламенения такой смеси, достигаются лишь после прохождения по ней отраженной от дна трубки ударной волны. Причем резко негативное влияние на вероятность самовоспламенения смеси оказывает повышение исходного давления воздуха в корпусе трубки. Кроме того, расчет указывает на то, что для метано- и пропановоздушной смеси даже после ее вторичного сжатия за фронтом отраженной волны условия, благоприятные для самовоспламенения, реализуются только при относительно высоком давлении горючего газа перед началом его истечения в трубку и одновременно при малом исходном давлении воздуха в ней. Результаты расчета удовлетворительно согласуются с имеющимися экспериментальными данными для водородовоздушной смеси.

Стимулированию процессов воспламенения и сгорания топливовоздушных смесей различных составов уделяется значительное внимание. Для реализации такого процесса наряду с химическим промотированием в некоторых случаях оказывается целесообразным использовать «газодинамическое» воздействие [1], с помощью которого путем организации интенсивного перетекания химически активного вещества, возбуждения в нем ударных волн, их кумуляции и т. д. удается, например, снизить период задержки воспламенения или расширить его пределы [1–5 и др.]. Примеры повышения способности топливовоздушных смесей к самовоспламенению приведены в [6–8]. В этих работах показано, что при импульсном высоконапорном впрыске горючих газов в воздух, находящийся при нормальных условиях, может происходить их самовоспламенение даже в отсутствие внешнего теплового инициирующего импульса, а также без предварительного перемешивания газов. В [7] описано устройство, с помощью которого такой режим воспламенения можно осуществить. Принцип его действия ясен из рис. 1. После разрыва мембраны горючий газ, находящийся под достаточно большим давлением в ресивере, начинает истекать в заполненную воздухом трубку. По сути дела, это устройство является ударной трубкой, в конце рабочего участка которой установлена заглушка с отверстием, диаметр которого d согласо-

ван с диаметром d_p и длиной l канала. Если давление в ресивере выше некоторого предельного p_{cr} , наблюдаются воспламенение истекающей из отверстия струи горючего газа и последующее сгорание газа вне устройства.

Особенности этого явления экспериментально изучались при использовании в качестве горючего газа водорода [7, 9, 10]. Получены зависимости p_{cr} от геометрических параметров трубки (d/d_p и l/d_p), и показано, что существует оптимальное соотношение между

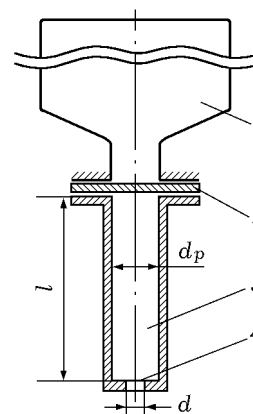


Рис. 1. Схема устройства для импульсного высоконапорного впрыска горючего газа в воздух:

1 — ресивер, 2 — мембрана, 3 — рабочий участок ударной трубки, 4 — донное отверстие

ними, при котором достигается минимальное значение p_{cr} (≈ 4 МПа при нормальных условиях в рабочем участке трубки и при $d/d_p \approx 0,4$ [7]). Изменение этих параметров в любую сторону от оптимальных ведет к повышению p_{cr} или вообще к прекращению самовоспламенения. Показано также [10], что увеличение исходного давления воздуха в трубке p_1 на каждые 0,1 МПа влечет за собой увеличение значения p_{cr} примерно на 2 МПа. Следует отметить и неудачную попытку добиться в таких же условиях самовоспламенения метано-воздушной смеси [7]. Кроме указанных экспериментальных исследований в [11] кратко рассмотрена заключительная стадия процесса — развитие и сгорание струи водородовоздушной смеси уже вне трубки.

Несмотря на определенное количество накопленного к настоящему времени экспериментального материала, описывающего в основном результирующие или внешние эффекты рассматриваемого явления, особенности течения внутри трубки не исследовались. Лишь в [7] на основании косвенных наблюдений высказано предположение о том, что первичный очаг, инициирующий воспламенение струи смеси, образуется в слое перемешавшихся газов в окрестности контактной поверхности после его сжатия и нагрева за фронтом ударной волны. И если температура и длительность существования такого очага достаточны, то после выброса в свободное пространство он может поджечь струю горючего газа, истекающую из донного отверстия трубки. Но такая качественная картина явления до настоящего времени не подкреплена какими-либо количественными оценками.

Между тем газодинамическое промотирование самовоспламенения реагирующих газовых смесей не только представляет собой интересный физический феномен, но и имеет большое практическое значение. Очевидно, что при разрывах емкостей или продуктопроводов, по которым транспортируются горючие газы, могут возникать условия, способствующие их самовоспламенению даже в отсутствие явных провоцирующих факторов. С такими же проблемами можно столкнуться и при анализе работы различного рода вентильных устройств и задвижек, работающих в оперативно-импульсных режимах. И поэтому прогнозирование условий, при которых может сложиться аварийная ситуация, остается

важнейшей научно-технической задачей. Особую значимость проблема приобретает в горнодобывающей промышленности, где наряду с образованием пыле- и газовоздушных взрывоопасных смесей возможно появление достаточно мощных ударных волн (буровзрывные работы, «внезапные выбросы» [12]). С другой стороны, рассматриваемое явление может быть использовано в химических технологиях для инициирования термохимических процессов. Еще одна область применения — двигателестроение. При конвертировании [13] дизельных двигателей на экологически более чистое газовое топливо (водород, природный газ, пропан) конструктивно нецелесообразно достижение такой степени сжатия, при которой осуществляется самовоспламенение смеси в цилиндре. Поэтому в таких двигателях чаще всего применяют запальное жидкое топливо («газодизель» [14]). Использование же в камерах сгорания перспективных газовых двигателей газодинамического промотирования может продвигнуть решение проблемы.

В настоящей работе рассматривается простейшая схема распространения ударных фронтов в рабочем участке ударной трубки, возникающих после прорыва диафрагмы, разделяющей горючий газ и воздух.

Рассмотрим физическую модель явления, привязывая ее к функционированию устройства, показанного на рис. 1. Очевидно, что воспламенение первоначально холодного газа не может осуществиться без выполнения по крайней мере двух условий [15]. Во-первых, в каком-то месте пространства должно образоваться достаточное количество реакционноспособной смеси. И, во-вторых, этой смеси необходимо в течение некоторого времени (не меньше периода индукции) находиться при температуре, не меньшей температуры самовоспламенения. Такой инициирующий центр снаружи трубки возникнуть не может, так как здесь смесь образуется лишь в том случае, когда из отверстия вслед за воздухом начинает истекать струя горючего газа. А температура в зоне турбулентного перемешивания не может сколь-нибудь повыситься, тем более что газ после истечения из ресивера сильно переохлажден. Поэтому указанные выше условия могут реализоваться внутри самой трубки в процессе возникновения в ней зон смешения и распространения ударно-волновых возмущений. Косвенные подтверждения содержатся в работах [7, 9]. Дей-

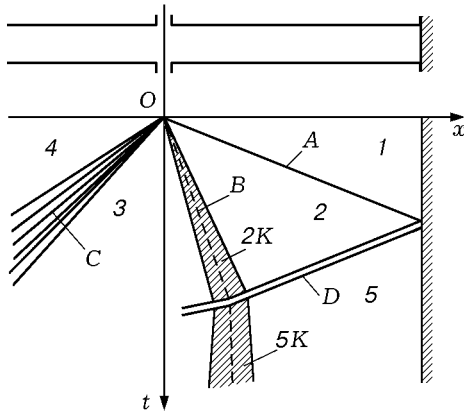


Рис. 2. Схема распространения волновых фронтов в рабочем участке ударной трубки:

A — падающая ударная волна, B — контактный разрыв, C — центрированная волна разрежения, D — отраженная ударная волна; состояние газов: 1 — невозмущенный воздух, 2 — воздух, сжатый за падающей ударной волной, 3 — истекающий из секции высокого давления горючий газ, 4 — невозмущенный горючий газ, 5 — воздух, сжатый за отраженной ударной волной, $2K$ и $5K$ — состояние смеси газов, образовавшейся в окрестности контактного разрыва

ствительно, при слишком большом донном отверстии, когда первичная ударная волна практически без отражения выходит в открытое пространство, воспламенения не наблюдается. Наоборот, при малом диаметре отверстия полноценное воспламенение струи горючего газа также не происходит, но зафиксировано появление вспышки в виде язычка пламени из отверстия. Снижается вероятность самовоспламенения при слишком длинной или слишком короткой трубке. В первом случае это объясняется снижением интенсивности течений из-за повышения потерь на стенках канала и длительным продвижением возникшего очага пламени к выходному отверстию. Во втором — волновые структуры просто не успевают сформироваться. Поэтому для уточнения и описания условий возникновения первичного очага пламени рассмотрим характер течения в рабочем участке ударной трубки.

Схема распространения волновых фронтов в канале устройства представлена на рис. 2. Для получения принципиальных количественных результатов задачу целесообразно идеализировать: течение одномерно, пристеночные явления и теплоотвод отсутствуют, газы считаются идеальными. При условии мгновенного удаления диафрагмы имеем классическую за-

дачу о распаде разрыва с образованием плоской ударной волны A в секции низкого давления, содержащей невозмущенный воздух, и с образованием центрированной волны разрежения C в секции высокого давления, заполненной горючим газом. Для расчета характеристик течения в трубке удобно воспользоваться результатами решения соответствующей системы уравнений в форме, представленной в [16].

Итак, температура T_2 за фронтом падающей ударной волны A в зоне сжатия 2 и температура толкающего газа T_3 в зоне разрежения 3 за волной C описываются следующими соотношениями:

$$T_{21} = p_{21} \frac{\alpha_1 + p_{21}}{1 + \alpha_1 p_{21}}, \quad T_{34} = (p_{34})^{2\beta_4}. \quad (1)$$

Здесь введены коэффициенты: $\alpha_1 = (\gamma_1 + 1)/(\gamma_1 - 1)$, $\beta_4 = (\gamma_4 - 1)/\gamma_4$; относительные температура и давление: $T_{21} = T_2/T_1$, $T_{34} = T_3/T_4$, $p_{21} = p_2/p_1$, $p_{34} = p_3/p_4$; очевидные дополнительные условия: $T_1 = T_4$, $p_2 = p_3$. В свою очередь, относительное давление за фронтом ударной волны p_{21} может быть определено из формулы

$$p_{14} = \frac{1}{p_{21}} \left[1 - (p_{21} - 1) \sqrt{\frac{\beta_4 \varepsilon_{14}}{\alpha_1 p_{21} + 1}} \right]^{1/\beta_4}, \quad (2)$$

где $p_{14} = p_1/p_4$, $\varepsilon_{14} = k_{14}T_{14}$, $k_{14} = c_{v1}/c_{v4}$, а также формально $T_{14} = T_1/T_4$. Во всех соотношениях подстрочные индексы 1–4 при обозначениях давления p , температуры T , показателя адиабаты γ и удельной теплоемкости при постоянном объеме c_v газов соответствуют зонам 1–4.

Само по себе знание температур T_2 и T_3 не отвечает на вопрос о возможности возникновения очага пламени, какое бы значение они не принимали, так как по отдельности в зонах 2 и 3 нет условий для образования смеси. Единственным таким местом является контактная поверхность B , где возможно перемешивание горючего газа с воздухом. Очевидно, что по обе стороны от поверхности B за счет молекулярной диффузии образуется некоторый слой смеси газов $2K$ (заштриховано на рис. 2), в котором результирующая температура может достичь значения, требуемого для самовоспламенения. Нетрудно показать, что такая температура T_{2K} в окрестности контактного разрыва определяется соотношением

$$T_{2K} = \frac{k_{14}L_0T_2 + T_3}{k_{14}L_0 + 1}, \quad (3)$$

где L_0 — стехиометрический коэффициент.