

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. удастся, 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

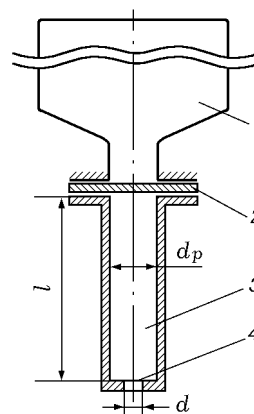


Рис. 1. Схема устройства для импульсного высоконапорного впрыска горючего газа в воздух:

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 вентиляционных 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 продвинуть 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-

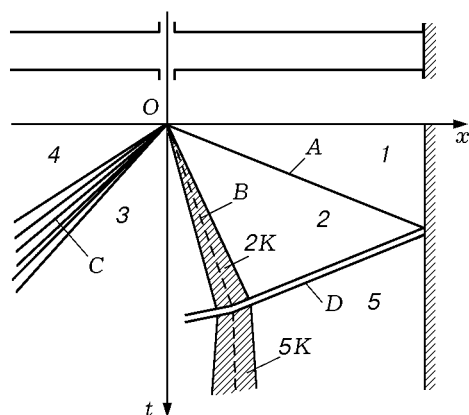


Рис. 2. Схема распространения волновых фронтов в рабочем участке ударной трубки:

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.

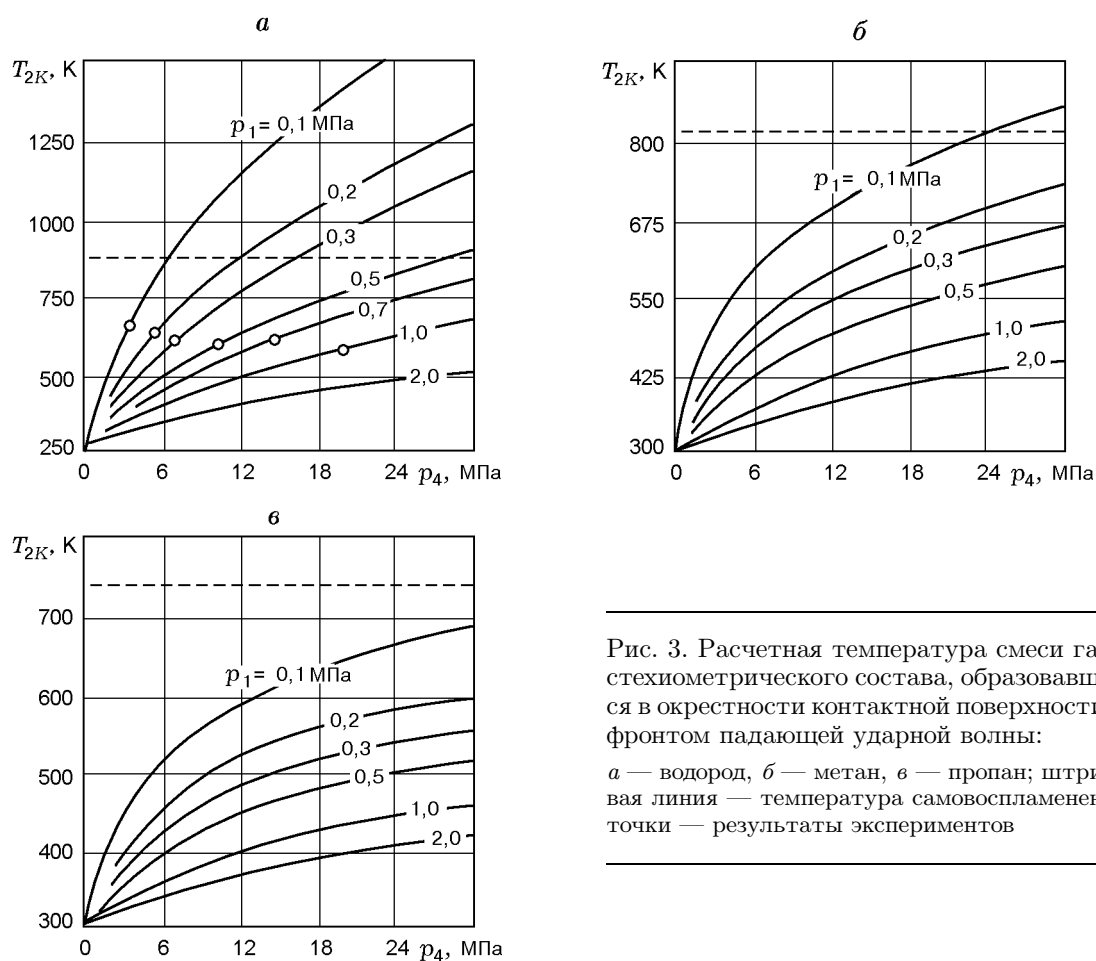


Рис. 3. Расчетная температура смеси газов стехиометрического состава, образовавшейся в окрестности контактной поверхности за фронтом падающей ударной волны:

a — водород, *б* — метан, *в* — пропан; штриховая линия — температура самовоспламенения, точки — результаты экспериментов

Если допустить, что воспламенение смеси вероятнее всего осуществляется в зоне, где состав близок к стехиометрическому, то расчет по формулам (1)–(3) для водорода, метана и пропана дает результаты, представленные на рис. 3. Расчеты проведены для различных исходных давлений в ресивере ($p_4 = 0,1 \div 32$ МПа) и воздуха в рабочей части ударной трубки ($p_1 = 0,1 \div 2$ МПа). Штриховой линией обозначена температура самовоспламенения смесей стехиометрического состава, находящихся при нормальном давлении [17].

Из рис. 3 следует, что лишь для водорода и только в сравнительно узком диапазоне исходных параметров (при высоких значениях p_4 и одновременно при относительно малых значениях p_1) в зоне смешения возможно достижение температуры самовоспламенения > 880 К. Во всех остальных случаях ее значение оказывается ниже. Таким образом, полученный расчетный результат ставит под сомнение пред-

положение [7] о том, что для создания условий, обеспечивающих самовоспламенение смеси, достаточно подогреть воздух только за счет его сжатия за фронтом первичной ударной волны. Этот результат в значительной степени определяется степенью переохлаждения горячего газа после прохождения по нему волны разрежения *C*. Кроме того, даже в случае, когда при высоком давлении p_4 и низком значении p_1 расчетные условия самовоспламенения начинают выполняться, это не означает, что такой режим может стать характерным для анализируемого явления, так как при постановке задачи не учитывались неизбежные потери на трение и теплоотвод. Поэтому полученные расчетные данные следует считать оценкой сверху и реальная температура смеси в зоне *2K* оказывается ниже. Независимо от этого негативно на воспламеняемость смеси влияет и тот факт, что задержка воспламенения при повышении давления в ней многократно возрастает [18]. В таких

условиях потери увеличиваются и образование первичного огневого очага становится тем более проблематичным.

Но более выразительными по сравнению с изложенными выше доводами являются результаты сравнения расчетных данных с экспериментальными [7]. В опытах установлено, что для любого значения p_1 существует низшее предельное давление водорода p_{cr} , при превышении которого наблюдается надежное воспламенение струи после начала истечения ее из трубки. Именно эти значения давлений отмечены точками на рис. 3,а. Из рисунка следует, что температура смеси, которую можно было бы приписать всем зафиксированным случаям успешного самовоспламенения, совершенно не соответствует необходимому для этого уровню. Это обстоятельство логически отвергает связь между первичным сжатием и подогревом смеси за фронтом первичной ударной волны и образованием огневого центра.

Что же касается случаев с метаном или пропаном (см. рис. 3,б,в), то очевидно, что с помощью рассматриваемого устройства их самовоспламенение невозможно, если его объяснять исключительно подогревом смеси за фронтом первичной ударной волны.

Таким образом, для самовоспламенения газоздушных реагирующих смесей, образующихся при импульсном впрыске горючего газа в воздух, необходим дополнительный подогрев. В условиях функционирования описываемой ударной трубки такой процесс может быть осуществлен за счет дополнительного сжатия смеси в зоне 2К после прохождения по ней вторичной, отраженной от дна трубки ударной волны.

Рассмотрим второй этап процесса. Для его описания используется прежняя идеализированная схема расчета и действуют принятые ранее допущения. Кроме того, считая, что получаемые результаты являются оценкой сверху, не будем учитывать частичную потерю воздуха через торцевое отверстие. Это можно объяснить не только кратковременностью процесса пробега фронтов ударных волн в трубке. Оценка показывает, что если сечение донного отверстия составляет $\approx 15\%$ сечения канала (именно такое соотношение является оптимальным [7]), то потери давления в отраженной волне, согласно [19], не превышают 12%. Кроме того, сама волна полностью формируется на расстоянии, не большем трех

диаметров канала [20]. С учетом этого расчет проводился так же, как для закрытой наглухо трубки. Характеристики среды за фронтом (D на рис. 2) отраженной ударной волны (зона 5) могут быть описаны соотношениями [16]

$$T_{52} = p_{52} \frac{\alpha_1 + p_{52}}{1 + \alpha_1 p_{52}}, \quad p_{52} = \frac{\alpha_1 + 2 - p_{12}}{1 + \alpha_1 p_{12}}, \quad (4)$$

где $p_{52} = p_5/p_2$, $p_{12} = p_1/p_2$, $T_{52} = T_5/T_2$.

Промежуточный расчет, связанный с вычислением давления p_5 и температуры T_5 , позволяет перейти к оценке температуры T_{5K} смеси в зоне контакта газов. Существенно то, что к моменту прихода волны D зона успевает значительно расшириться, и благодаря этому количество реакционноспособной смеси возрастает. Оценка показывает, что только за счет молекулярной диффузии (особенно учитывая сравнительно высокие давление и температуру в окрестности контактного разрыва) эффективная ширина зоны составляет $0,7 \div 1,1$ мм. Но поскольку реальным механизмом перемешивания является турбулентная диффузия, глубина зоны смешения оказывается заметно большей.

На рис. 4 представлены полученные расчетным путем температуры смеси T_{5K} за фронтом отраженной ударной волны. Для определения этой температуры использована формула [16]

$$T_{5K} = T_{2K} p_{52} \frac{\alpha_m + p_{52}}{1 + \alpha_m p_{52}}, \quad (5)$$

где $\alpha_m = (\gamma_m + 1)/(\gamma_m - 1)$, γ_m — показатель адиабаты смеси газов стехиометрического состава.

Упрощенный подход к определению T_{5K} связан с тем, что слой смеси к моменту прихода к нему отраженной волны размыт, и усложнять оценочный расчет рассмотрением более строгого решения (распад разрыва на контактной поверхности с образованием дополнительной серии волн сжатия и разрежения) нецелесообразно.

Из рис. 4,а следует, что уровень температуры водородовоздушной смеси T_{5K} в окрестности контактной поверхности достаточно высок и в широком диапазоне исходных параметров соответствует необходимому для самовоспламенения. На этом рисунке также представлены экспериментальные данные (светлые кружки), которые уже использовались на рис. 3,а. Примечательно то, что в данном случае результаты измерений укладываются в тот

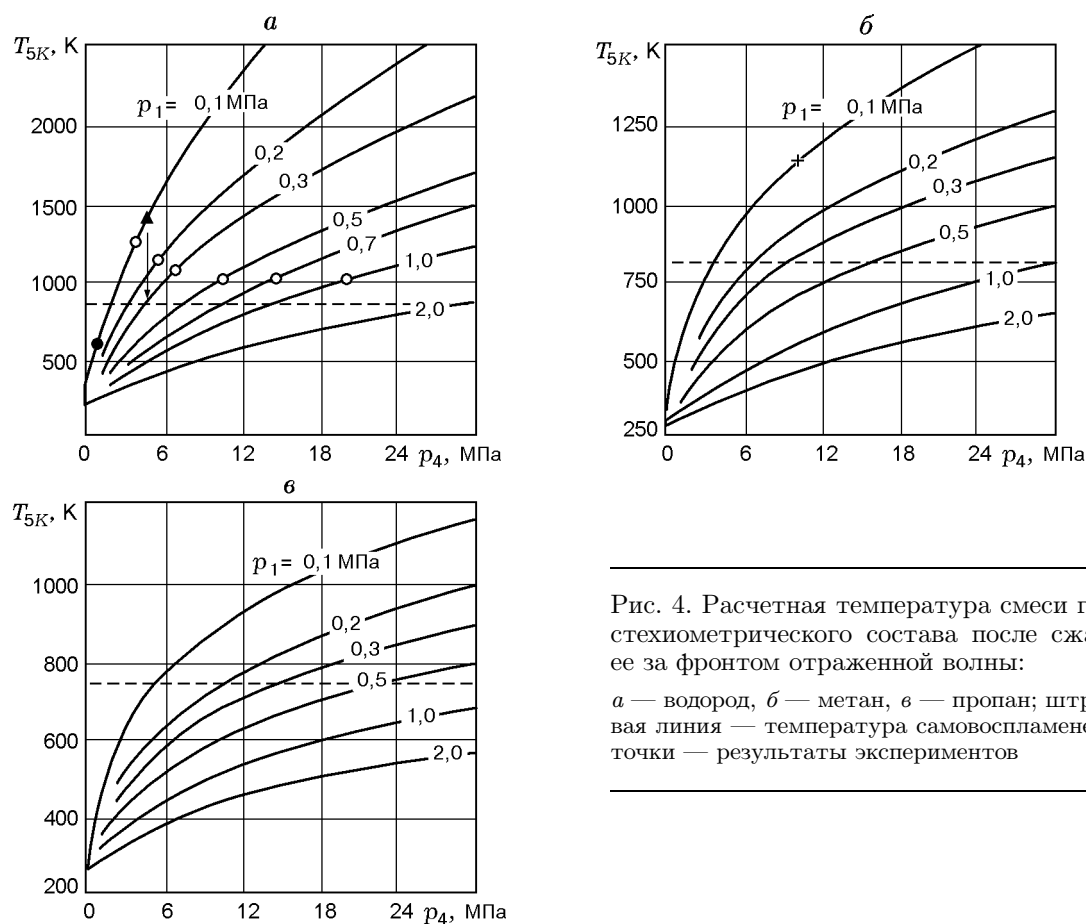


Рис. 4. Расчетная температура смеси газов стехиометрического состава после сжатия ее за фронтом отраженной волны:

a — водород, *b* — метан, *v* — пропан; штриховая линия — температура самовоспламенения, точки — результаты экспериментов

диапазон температур, которые требуются для самовоспламенения. Отметим, что в опытах ни разу не была зафиксирована вспышка при впрыске водорода в воздух при $p_1 > 2$ МПа вплоть до давления в ресивере $p_4 = 25$ МПа [9]. Положение соответствующей кривой на рис. 4, *a* объясняет этот результат невозможностью достижения в смеси требуемой температуры даже теоретически.

Результаты расчетов, приведенные на рис. 4, *b* для метановоздушной смеси, показывают, что в отличие от рассмотренного ранее случая (см. рис. 3, *b*) ее самовоспламенение за отраженной ударной волной вполне реально, хотя условия для этого в такой смеси значительно хуже: относительно низкий коэффициент диффузии, узкие концентрационные пределы самовоспламенения, высокий период индукции и пр. Возможно, именно этими причинами объясняется неудачная попытка осуществить самовоспламенение метановоздушной смеси [7]

в тех же условиях, в которых водородовоздушная смесь легко воспламенялась.

Таким образом, полученный качественный и количественный результат не отвергает возможности самовоспламенения в условиях ограниченного пространства струи смеси, образованной импульсным впрыском метана в воздух. Особую значимость эта проблема приобретает при рассмотрении вопросов взрывобезопасности на предприятиях горнодобывающей промышленности, опасных по содержанию пыли и газа в воздухе. Известно [12], что в шахтных выработках технологический процесс добычи угля нередко сопровождается так называемыми «внезапными выбросами» угольной крошки и метана. При этом вскрытая часть нагруженного горным давлением пласта (до 10 МПа на глубине 500 м [21]) претерпевает лавинообразно нарастающее разрушение с массивным выделением растворенного в угле и адсорбированного в его порах газа (в каждой

тонне угля содержится до 6 м^3 метана, первоначально находящегося под давлением, соответствующим горному [21]). Под действием столь мощного газодинамического поршня в выработках могут формироваться достаточно интенсивные ударные волны [22]. А загромождающее проемы оборудование, тупиковые выработки и прочее создают условия для появления отраженных волн, которые, возвращаясь к месту выброса, могут подогреть смесь до температуры, при которой возможно самовоспламенение. На рис. 4,б, например, крестиком отмечена температура метановоздушной смеси, которую она может достигнуть за прямой отраженной ударной волной в случае выброса метана, находящегося под исходным давлением 10 МПа. Из рис. 4,б следует, что эта температура находится в «зоне опасности». Воспламенение смеси может происходить и просто в плохо вентилируемых выработках, в которых воздух всегда загазован и возможна кумуляция ударных волн в тупиках или сужениях [3].

Условия воспламенения пропановоздушной смеси еще более «трудные», чем метаноили водородовоздушной (см. рис. 4,в). Но при определенном стечении обстоятельств самовоспламенение возможно при внезапном выбросе пропана в ограниченное пространство, заполненное воздухом при нормальных условиях.

В заключение следует отметить результаты единичного эксперимента, в котором предпринята попытка практически реализовать рассмотренный выше принцип «газодинамического промотирования». Для этого в камеру сгорания установки быстрого сжатия [23], предварительно заполненную воздухом при нормальных условиях, с помощью изображенного на рис. 1 устройства ($l = 80 \text{ мм}$, $d_p = 10 \text{ мм}$, $d = 4 \text{ мм}$) осуществлялся импульсный впрыск водорода, запасенного в ресивере емкостью 190 см^3 под давлением $p_4 = 0,8 \text{ МПа}$. Такая схема смесеобразования позволяла получать в цилиндре установки (длина 200 мм, диаметр 150 мм) после перемешивания газов и выравнивания температуры и давления водородовоздушную смесь состава, близкого к стехиометрическому. С одной стороны, расчет (см. выше) показывает, что такой впрыск не ведет к воспламенению струи ($T_{2K} = 430 \text{ К}$, $T_{5K} = 660 \text{ К}$, точка, обозначенная темным кружком на рис. 4,а). С другой — режим работы установки был таков, что смесь не воспламенялась и от сжатия после пуска поршне-

вой группы (измеренные давление и температура смеси при положении поршня в верхней мертвой точке составляли 1,06 МПа и 590 К). Поэтому обычно для поджига смеси использовался искровой разряд. Когда же давление в ресивере было поднято до 4,5 МПа, впрыск водорода стал сопровождаться воспламенением струи ($T_{2K} = 750 \text{ К}$, $T_{5K} = 1370 \text{ К}$, точка, обозначенная треугольником на рис. 4,а), но только на начальной стадии движения поршня, когда давление в цилиндре еще не превышало $\approx 0,3 \text{ МПа}$. Это, очевидно, объясняется тем, что по мере продвижения поршня происходит постепенное натекание воздуха в трубку через донное отверстие, что эквивалентно повышению внешнего давления p_1 , и воспламенение прекращается (стрелка на рис. 4,а). Для того чтобы обойти это неблагоприятное обстоятельство, в нескольких опытах на дне трубки устанавливали односторонний лепестковый клапан, предотвращавший до впрыска водорода поступление воздуха в трубку из цилиндра на стадии сжатия. В этом случае воспламенение водородовоздушной смеси в трубке происходило при любом положении поршня. Правда, при приближении его к верхней мертвой точке процесс ограничивался лишь появлением язычка пламени из отверстия, но воспламенения струи в объеме не происходило. Такой же эффект описан в [9], и он объясняется действием двух факторов. С одной стороны, при повышении давления среды осуществляются более быстрое смешение струйки реагирующей смеси и продуктов ее сгорания с холодным воздухом и их остывание, с другой — задерживаются поступление газа в пространство и процесс образования смеси. Тем самым условия для ее воспламенения в объеме ухудшаются.

Таким образом, результаты описанного опыта свидетельствуют о возможности стимулирования воспламенения газового топлива в условиях работы, например, дизельного двигателя.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 97-01-00506).

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов А. А., Гельфанд Б. Е., Цыганов С. А. Газодинамические эффекты при самовоспламенении распыленного жидкого топлива // Докл. АН СССР. 1985. Т. 281, № 2. С. 361–363.

2. **Сеначин П. К., Бабкин В. С., Борисенко А. В.** Самовоспламенение смеси перед фронтом пламени в поршневых двигателях с искровым зажиганием // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33, № 6. С. 4–8.
3. **Гостинцев Ю. А., Гусев П. А., Бохан Ю. А. и др.** Ударно-волновое воспламенение водородно-воздушной смеси в конической полости // Хим. физика. 1997. Т. 16, № 12. С. 69–81.
4. **Баев В. К., Бузуков А. А., Тимошенко Б. П.** Эффект вторичного смесеобразования как средство улучшения воспламеняемости топливовоздушной смеси в дизеле // Физико-химические проблемы сжигания углеводородных топлив: Тез. докл. Всерос. научн. конференции (Москва, 20–22 мая 1998). М.: ЦИАМ, 1998. С. 60–61.
5. **Гельфанд Б. Е., Хомик С. В., Медведев С. П. и др.** Самовоспламенение гомогенных газовых смесей вблизи неплоских поверхностей // Докл. РАН. 1998. Т. 359, № 4. С. 490–494.
6. **Wolanski P., Wojcicki S.** Investigation into the mechanism of the diffusion ignition of a combustible gas flowing into an oxidizing atmosphere // 14th Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh: The Combustion Inst., 1973. P. 1217–1223.
7. **Баев В. К., Шумский В. В., Ярославцев М. И.** Самовоспламенение горючего газа, истекающего в среду газообразного окислителя // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 5. С. 73–80.
8. **Быковский Ф. А., Митрофанов В. В., Ведерников Е. Ф.** Самовоспламенение в потоках газовых смесей // Докл. РАН. 1998. Т. 358, № 4. С. 487–489.
9. **Baev V. K., Buzukov A. A., Konstantinovsky V. A. et al.** Hydrogen jet combustion // Hydrogen Energy Progress V: Proc. 5th World Hydrogen Conference (Toronto, Canada, July 15–20, 1984). New York: Pergamon Press, 1984. V. 4. P. 1641–1648.
10. **Баев В. К., Бузуков А. А., Тимошенко Б. П. и др.** Самовоспламенение водорода при импульсном высоконапорном впрыске его в воздух // Структура газозажигательных пламен: Материалы Всесоюз. семинара (Новосибирск, 12–15 июля 1983). Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1984. Ч. I. С. 179–188.
11. **Baev V. K., Buzukov A. A., Shumskii V. V.** Unsteady structure of a hydrogen jet and the conditions of shock-induced ignition under its injection into air at high pressure // Advances in Experimental and Computation of Detonation: Book of Abstr. Intern. Colloquium (St. Petersburg, Russia, September 14–17, 1998). Moscow: ENAS Publishers, 1998. P. 108.
12. **Ходот В. В.** Внезапные выбросы угля и газа. М.: Гос. науч.-техн. изд-во лит. по горному делу, 1961.
13. **Feucht K., Holzel G., Hurich W.** Perspectives of mobile hydrogen application // Hydrogen Energy Progress VII: Proc. of 7th World Hydrogen Conference (Moscow, USSR, September 25–29, 1988). New York: Pergamon Press, 1988. V. 3. P. 1963–1974.
14. **Кудряш А. П., Мараховский В. П., Кайдалов А. А.** Исследование рабочего процесса газодизеля // Альтернативные топлива в двигателях внутреннего сгорания: Тез. докл. Всесоюз. научно-техн. конференции (Киров, 24–27 мая 1988). Киров: Киров. сельскохозяйственный ин-т, 1988. С. 75.
15. **Щетинков Е. С.** Физика горения газов. М.: Наука, 1965.
16. **Хэншелл Б. Д.** Некоторые аспекты использования ударных труб в аэродинамических исследованиях. I // Ударные трубы: Сб. статей / Под ред. Х. А. Рахматуллина и С. С. Семенова. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. С. 19–70.
17. **Дубовкин Н. Ф.** Справочник по углеводородным топливам и их продуктам сгорания. М.: Гос. науч.-техн. изд-во энергет. лит., 1962.
18. **Гельфанд Б. Е., Попов О. Е., Медведев С. П. и др.** Отличительные признаки самовоспламенения водородовоздушных смесей при высоком давлении // Докл. РАН. 1993. Т. 330, № 4. С. 457–459.
19. **Гринь В. Т., Крайко А. Н., Миллер Л. Г.** К распаду произвольного разрыва на перфорированной перегородке // ПМТФ. 1981. № 3. С. 95–103.
20. **Николаев Г. И.** Экспериментальное исследование формирования ударной волны, отраженной от стенки с отверстием // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1974. № 2. С. 176–181.
21. **Одинцев В. Н.** Внезапный выброс угля и газа — разрушение природного угля как раствора метана в твердом веществе // Физ.-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 1997. № 6. С. 18–28.
22. **Кузнецов С. В., Окончук Б. Н.** Движение газозольной смеси при внезапных выбросах // Физ.-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 1974. № 2. С. 94–100.
23. **Бузуков А. А.** Установка быстрого сжатия для исследования процессов в ДВС // Динамика систем, механизмов и машин: Тез. докл. Междунар. научно-техн. конференции (Омск, Россия, 21–24 ноября 1995). Омск: Омск. гос. ун-т, 1995. Кн. 1. С. 70–72.

*Поступила в редакцию 29/III 1999 г.,
в окончательном варианте — 22/VII 1999 г.*