

МЕХАНИЗМ ПРЕДЕЛОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ В ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМАХ ПЛЕНКА СМАЗОЧНОГО ВЕЩЕСТВА — ГАЗООБРАЗНЫЙ ОКИСЛИТЕЛЬ

В. Ф. Плешаков, Н. А. Щепотьев, Б. А. Иванов

(Балашиха)

Механизм и пределы распространения пламени в гетерогенных системах, образующихся при контакте тонких пленок смазочного вещества с газообразным окислителем, до настоящего времени изучены мало. Известен ряд экспериментальных исследований пределов распространения пламени, выполненных с целью получения практических рекомендаций, необходимых для обеспечения безопасных условий при работе с кислородом [1—5].

Приводимые в [1—5] данные получены при испытаниях различных веществ (масел, консистентных смазок и т. п.), выпускаемых промышленностью. Свойства и структура этих веществ очень сложны, а области изменения параметров газообразного окислителя и пленки смазки недостаточно широки для того, чтобы полученные данные могли быть надежно использованы для разработки возможных механизмов горения и потухания. С другой стороны, проведение подробных исследований на простых веществах без всестороннего анализа имеющихся данных представляется преждевременным, так как может привести к нерациональным затратам на изучение частных сторон явления.

Более рационально сначала провести подробные исследования с ранее изучавшимися [2—5] и вновь освоенными промышленностью веществами в широкой области изменения параметров окислителя для того, чтобы установить те черты механизма горения и потухания, которые не зависят от конкретного вида и структуры вещества. Такое исследование актуально не только с практической, но и с научной точки зрения, так как может дать ценные сведения, необходимые для построения общей теории пределов гетерогенного горения.

В настоящей работе на основе теоретического анализа и более подробного, чем в [2—5], экспериментального изучения предложена физическая модель горения гетерогенных систем пленка смазочного вещества — газообразный окислитель вблизи пределов потухания, которая позволяет обобщить имеющиеся экспериментальные данные, наметить пути дальнейших исследований и увидеть перспективы создания новых негорючих смазок.

Экспериментально определялись предельные (минимальные) давления p_n (ат), при которых зона горения не распространялась по всей длине слоя смазки (давления потухания). Смазка наносилась на гладкую поверхность из латуни, стекла или керамики. Для получения плоской пленки смазки заданной толщины использовался набор кювет длиной 200 ÷ 400 и шириной 10 ÷ 30 мм. Высота боковых барьеров кювет, предотвращающих растекание смазки, соответствовала толщине наносимого слоя (пленки) (от 50 до 3000 мкм). Одинаковая толщина слоя по всей поверхности для консистентных смазок достигалась приглаживанием нанесенного с небольшим избытком слоя гладкой пластинкой, скользящей по боковым барьерам кюветы. Толщина полученного слоя контролировалась измерением веса смазки, распределенного на заданной поверхности. Весовой способ определения толщины пленки был единственным при испытании очень тонких пленок (от 1 до 50 мкм) и пленок любой толщины при испытаниях в трубе.

Опыты проводились в среде чистого кислорода и в кислородно-азотных смесях. Зажигание пленки исследуемой смазки производилось с одного конца от слоя смазки ЦИАТИМ-221, которая, в свою очередь, поджигалась от проволоочки, нагреваемой электрическим током. Таким способом во всех опытах обеспечивалось горение смазки на начальном участке пленки длиной около 15 мм. Возможность самоподдерживающегося распространения пламени по всей длине слоя смазки, не зависящая от мощности используемого источника зажигания, изучалась при различных фиксированных значениях толщины пленки, диаметра трубы, температуры, концентрации и скорости потока кислорода. При этом устанавливались области давлений, в которых процесс распространения пламени по всей длине слоя смазки носил неустойчивый, случайный характер. Границы этих областей, приводимые на рис. 2—4, определялись по результатам 5—7 опытов, дающих соответственно положительный результат (во всех опытах пламя распространяется по всей длине слоя) или отрицательный результат (во всех опытах происходит потухание на расстоянии, меньшем длины слоя). Полное число опытов в каждой области давлений достигало 20.

Для ряда веществ была произведена статистическая обработка результатов испытаний по зависимостям, полученным на основе предлагаемой здесь физической модели потухания. Среднестатистические значения давлений потухания использовались для быстрого нахождения областей неустойчивого горения при различных параметрах окислителя и пленки. Другие детали экспериментальных исследований были разработаны ранее [4, 5].

Для установления возможных механизмов потухания рассмотрим некоторые экспериментально наблюдаемые явления. Опыты показали, что давления потухания практически не зависят от теплофизических свойств материала, на который наносится пленка. Так, например, области неустойчивого распространения пламени для пленок смазки одной и той же толщины, нанесенных на поверхность латуни и теплоизолирующей пластмассы, оказались в пределах точности опытов одинаковыми. Это означает, что при рассмотрении процесса распространения пламени вблизи пределов потухания тепловые потоки от пленки смазки в твердый материал можно не учитывать.

Особенностью горения смазок при давлениях, близких к предельным, является их неполное выгорание при прохождении зоны горения по всей длине слоя. Полное выгорание смазки наблюдается только в случаях горения очень тонких пленок (с толщиной $h < 5$ мкм) и при давлениях, во много раз превышающих среднестатистические давления потухания. При давлениях, близких к предельным, после прохождения пламени остается недогоревший слой смазки, имеющий практически ту же толщину, что и до горения, но более рыхлый, отличающийся от первоначального физико-химическими свойствами. При повторном зажигании обнаружилось, что пределы потухания оставшегося слоя смазки выше, чем первоначального. Таким образом, горение по однажды нанесенному слою смазки может быть возбуждено несколько раз, если после каждого случая горения повышать давление газообразного окислителя.

Наблюдаемые явления связаны с тем, что под воздействием тепловых потоков из зоны горения происходит объемное термическое разложение смазки (крекинг), в результате чего из нее в первую очередь выделяются легкокипящие компоненты (в случае минеральных масел — углеводороды). Большинство смазок имеют очень сложный состав и их температура кипения (или термического разложения) T_k повышается по мере испарения легколетучих компонентов. После однократного прохождения зоны горения остаются более тяжелые компоненты, причем наблюдается образование кокса и других веществ.

На рис. 1 изображена схема процесса горения плоской пленки смазки, составленная по визуальным наблюдениям и изучению фотоснимков процесса. Интенсивное выделение горючих компонентов начинается в поперечном сечении смазки, расположенном на некотором расстоянии l_0 впереди зоны горения. Этому сечению соответствует значение координаты $x=0$ и температуры кипения смазки, которая при $x>0$ возрастает вследствие выкипания легколетучих компонентов. Для тонких пленок можно принять, что они равномерно прогреваются по всей толщине, так что T_k не зависит от y при $x>l_0$.

Поток массы горючих компонентов с поверхности смазки $m_g = \rho_g v_g$ (кг/(м²·с)), где ρ_g и v_g соответственно плотность и скорость этих компонентов в газовой фазе. Этот поток массы не постоянен по длине слоя при $x>0$ из-за выкипания компонентов. Локальные значения m_g при $x>l_0$ можно связать со скоростью объемного термического разложения смазки ω (кг/(м³·с)) и толщиной пленки h уравнением сохранения массы $\omega h = \rho_g v_g$. Для ω обычно используют аррениусовский вид зависимости $\omega \sim \exp(-L/R_g T_k)$, где L — теплота испарения, R_g — газовая постоянная, зависящая в данном случае от x . Среднее значение $\bar{\omega}$ может быть получено выбором некоторых средних значений L , R_g , T_k на участке длиной l (методы определения L , R_g , T_k для некоторых многокомпонентных смазок даны в [6]).

Примем, что зона реакции, в которой образуются конечные продукты горения смазки, настолько узка, что ее можно рассматривать как поверхность (поверхность горения) (см. рис. 1). Вследствие перемешивания продуктов сгорания с исходной смесью вблизи поверхности горения образуется диффузионный пограничный слой, который оказывает сопротивление движению в зону окончательного реагирования (к поверхности горения) горючих компонентов, кислорода и активных промежуточных продуктов (атомов, свободных радикалов, перекисей и т.п.). Из-за наличия потока горючих компонентов с поверхности испаряющейся смазки диффузия продуктов сгорания в сторону смазки (по оси y) затруднена, и можно ожидать, что диффузионный пограничный слой полностью вытесняется и располагается над поверхностью горения (см. рис. 1). При этом можно допустить, что скорость горения контролируется либо скоростью диффузии кислорода, либо скоростью диффузии активных продуктов через этот слой.

Диффузионный механизм горения подтверждается специальными опытами. Потoki кислорода, имеющие скорости, сравнимые по величине со скоростью распространения пламени и направленные противоположно, приводили к увеличению последней в 1,5—2 раза. Уменьшение предельных давлений наблюдалось при малых потоках, направление которых совпадало с направлением распространения пламени. Однако установить природу частиц, диффузия которых определяет скорость горения с помощью используемых в данной работе экспериментальных средств, оказалось невозможным. Ниже более подробно рассмотрен механизм, в котором предполагается, что скорость горения (скорость образования конечных продуктов на поверхности горения) вблизи пределов потухания лимитируется скоростью диффузии активных промежуточных продуктов. Только последнее допущение позволяет получить для большинства веществ совпадение теоретических и эксперименталь-

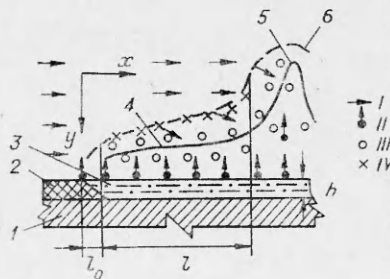


Рис. 1. Схема процесса горения пленки смазки.

1 — твердая поверхность; 2 и 3 — начальная и испаряющаяся пленка; 4 и 5 — проникающее и подпитывающее пламя; 6 — граница пограничного слоя; I — окислитель; II — горючее; III — продукты; IV — активные продукты.

ных результатов, показывающих зависимость предельных давлений от толщины слоя смазки, начальных концентраций и температуры кислорода, скорости его потока, диаметра трубы. Отклонения от рассматриваемого механизма, наблюдаемые для некоторых веществ, обсуждаются отдельно.

Зона горения на начальном участке почти параллельна поверхности смазки. Система отсчета (x, y) , связанная с изотермической поверхностью $T = T_k$ (см. рис. 1), движется со скоростью распространения зоны горения u . Вместе с этой поверхностью со скоростью u движутся все изотермические поверхности внутри слоя смазки на некотором участке $x > l_0$, имеющем длину l . Соответственно этому все точки участка поверхности горения $l_0 < x < l$ («проникающей» части пламени) также движутся со скоростью u относительно лабораторной системы отсчета.

Экспериментально замечено, что скорости изотермических поверхностей в слое смазки и скорости точек поверхности горения на участке $x > (l_0 + l)$ («подпитывающей» части пламени) становятся меньше u , т. е. происходит отставание подпитывающей части пламени от проникающей части. Это явление связано с тем, что толщина диффузионного слоя над проникающей частью пламени возрастает вдоль оси x из-за увеличения доли газообразных продуктов. Вследствие этого скорости диффузии активных продуктов и тепловые потоки, генерируемые на поверхности горения и передаваемые частично пленке смазки, уменьшаются. Последнее приводит к тому, что при некотором $x = (l_0 + l)$ происходит разрыв пламени и подпитывающая часть превращается в независимый, постепенно затухающий факел. Одновременно у проникающего пламени снова развивается подпитывающая часть и процесс повторяется. Вблизи предела потухания это явление приводит к пульсациям скорости u , а на пределе потухания происходит полный отрыв проникающего пламени от подпитывающего. Подробное исследование процесса потухания возможно, таким образом, только с учетом его нестационарности и достаточно сложно. Для разработки физической модели процесса горения вблизи пределов потухания ниже принимается ряд упрощающих допущений.

Принимается, что потухание происходит при некотором критическом (предельном) значении длины $l = l_k$ проникающего пламени. Это означает, что существует предельное значение потока массы горючих компонентов m_n через участок поверхности смазки длиной l_k . Для плоского слоя большой ширины (одномерная задача) имеет значение предельный массовый поток $m_n = \omega h l_k$ (кг/(м·с)), отнесенный к единице ширины. Аналогичный поток массы будет иметь значение и при рассмотрении процесса потухания в трубе, когда диаметр трубы больше некоторого предельного, при котором еще можно говорить о пограничном слое в трубе на участке длиной l_k . Для случая труб малых диаметров, когда пограничные слои смыкаются на расстоянии, меньшем l_k , естественно допустить, что потухание происходит при некотором значении массового потока горючих компонентов $m'_n = \omega h l'_k \pi d$ (кг/с) со всего участка поверхности трубы длиной l'_k . Таким образом, здесь предполагается, что на пределе потухания существуют такие области изменения параметров газообразного окислителя и пленки смазки (начальной массовой доли кислорода в смеси Y , начальной температуры T_0 , скорости смеси U , диаметра трубы d , толщины пленки h), в границах которых предельное значение потока массы за счет испарения смазки m_n (или m'_n) постоянно, т. е. не зависит от этих параметров. Тогда должна существовать связь

$$l_k = m_n / \omega h \quad (l'_k = m'_n / \omega h \pi d). \quad (1)$$

В движущейся системе отсчета (x, y) поток массы m_a активных продуктов, поступающий через диффузионный пограничный слой к поверхности горения вследствие конвекции и молекулярной диффузии, представим через коэффициент массообмена β_a в виде $m_a = \rho_a \beta_a$, тогда тепловой поток, генерируемый на поверхности горения, $q = \rho_a \beta_a Q_a$ (Дж/(м²·с)), где парциальная плотность активных продуктов $\rho_a = \rho Y_a$; ρ — плотность смеси; Y_a — массовая доля активных продуктов на некоторой условной границе активированного пограничного слоя, где она имеет максимальное значение; $Q_a = Y_a Q$ — теплота реакции, отнесенная к единице массы активных продуктов; Q — теплота реакции, отнесенная к единице массы кислорода (Дж/кг·О₂).

Конкретный вид активных промежуточных продуктов не играет большой роли в дальнейших рассуждениях. Существенным, однако, является допущение о том, что качественный и количественный состав активных продуктов при горении определенной смазки в кислородно-азотной смеси зависит главным образом от концентрации кислорода. Так, принимается, что максимальное значение массовой доли активных продуктов в диффузионном слое над поверхностью горения пропорционально начальной массовой доле кислорода в смеси $Y_a = \alpha Y$. Тогда

$$q = \rho \beta_a (\alpha Y)^2 \cdot Q. \quad (2)$$

Без решения точных уравнений для распределения концентраций компонентов в пограничном слое коэффициент массообмена β_a может быть найден посредством использования аналогий, существующих между массообменом и обменом количества движения при $Pr = Sm = 1$, заключающихся в том, что $C_f = \beta/U = C_f/2$, где C_f — коэффициент вязкого трения, являющийся функцией $Re = \rho U x / \mu$ [7].

Для случая пластины, обтекаемой газом с плотностью ρ и скоростью U , имеются зависимости вида [8]

$$C_f = c (\rho U x / \mu)^{-\gamma},$$

где $\gamma = 0,2$ для турбулентного ($Re > 10^6$), $\gamma = 0,5$ для ламинарного ($Re < 5 \cdot 10^5$) режимов; c — постоянная, зависящая от γ .

Соответствие режимов смешения и значений γ наблюдается и при наличии горения в пограничном слое, однако при гораздо меньших числах Re . Дело в том, что в рассматриваемом случае переход от одного режима смешения к другому сильно зависит от массовой скорости движения газа с поверхности смазки $m_g = \rho_g v_g = \omega h$. Увеличение последней, соответствующее росту толщины пленки h , приводит к неустойчивости течения и турбулизации. Этому же способствуют изменение объема в результате реакций и другие термомеханические эффекты.

При переходе к названной выше аналогии для случая многокомпонентного пограничного слоя, коэффициент массообмена β_a необходимо определять по доле вязкого трения, создаваемого этим компонентом, т.е. в C_f произвести замену ρ на $\rho_a = \rho Y_a = \alpha \rho Y$. С учетом сказанного выражение для теплового потока, генерируемого на поверхности горения q , запишем в виде

$$q = 0,5 c \alpha^{2-\gamma} Q \rho U Y^{2-\gamma} (\rho U x / \mu)^{-\gamma}. \quad (3)$$

Для среднего значения \bar{q} на отрезке $l_0 < x < l$ получим

$$\left(\bar{q} = (1/l) \cdot \int_{l_0}^{l_0+l} q(x) dx \right):$$

$$\bar{q} = a Q \rho U Y^{2-\gamma} (\rho U l / \mu)^{-\gamma}, \quad (4)$$

где коэффициент a зависит от l_0, l, γ :

$$a = (0,5c\alpha^{2-\gamma}/(1-\gamma)) \cdot [(1+l_0/l)^{-\gamma+1} - (l_0/l)^{-\gamma+1}].$$

В формулах (3) и (4) величина U равна скорости внешнего потока, когда эта скорость во много раз превышает скорость распространения горения u , т. е. если $U \gg u$.

Если отсутствует внешний поток, то величину U надо заменить на u , поскольку роль внешнего потока в системе отсчета, движущейся вместе с пламенем, играет поток, обусловленный движением самой смеси со скоростью распространения горения. В общем случае, когда внешний начальный поток смеси сравним со скоростью распространения горения, в формулах (3) и (4) величину U надо заменить на $U \pm u$, где плюс соответствует потоку, направленному против распространения горения, а минус — потоку, направленному по распространению горения. Здесь пренебрегается составляющей скорости потока, обусловленной естественной конвекцией газа. Возможность пренебрежения процессами диффузии, вызванными естественной конвекцией, подтверждается опытами. Так, например, опыты по горению плоского слоя смазки, ориентированного под различными направлениями по отношению к направлению силы тяжести, показывают незначительную деформацию горячей поверхности и, кроме того, приводят к выводу о независимости пределов потухания от ориентации слоя смазки.

Поток энергии, выделяемый на поверхности горения, удобно представить в виде, в котором была бы видна его явная зависимость от давления p и начальной температуры смеси T_0 . Для этого в формуле (4) плотность смеси необходимо выразить через давление из уравнения состояния идеального газа $\rho = Mp/RT_0$, а коэффициент динамической вязкости из формулы $\mu = \mu_s (T_0/T_s)^m$, где M — молекулярный вес смеси; R — универсальная газовая постоянная; $m = 0,693$, $\mu_s = 1,98 \cdot 10^{-6}$ кГ·с/м² — для чистого кислорода, $m = 0,683$; $\mu_s = 1,75 \cdot 10^{-6}$ кГ·с/м² — для воздуха [6]; $T_s = 273$ К.

Подставляя выражения для ρ и μ в формулу (4), получим

$$\bar{q} = q_s Y^{2-\gamma} (T_0/T_s)^{(m+1)\gamma-1} (Q/Q_s) (p/p_s)^{1-\gamma} (U/U_s)^{1-\gamma} (l/l_s)^{-\gamma}, \quad (5)$$

где стандартные значения T_s, p_s, U_s, l_s могут быть выбраны произвольно и введены для того, чтобы формула для \bar{q}/\bar{q}_s имела безразмерный вид. При этом $Y_s = 1$, а

$$\bar{q}_s = a Q_s \rho_s U_s (\rho_s U_s l_s / \mu_s)^{-\gamma}.$$

Естественно ожидать, что при некоторых значениях физических параметров p, Y, U, T_0 , характеризующих процесс горения, должно существовать минимальное значение теплового потока \bar{q} , равное \bar{q}_n , при котором процесс распространения горения становится неустойчивым и происходит потухание. Это означает, что существуют области изменения параметров, в пределах которых тепловой поток \bar{q}_n постоянен, т. е. не зависит от этих параметров. Тем самым принимается, что механизм потухания один и тот же в широкой области изменения параметров задачи. В рассматриваемой модели горения это означает, что уменьшение скоростей диффузии активных продуктов, контролирующего процесс горения, может происходить только до определенной минимальной величины, которая не зависит от давления, скорости потока, температуры и других величин. Если же при некоторых значениях p, T_0, Y и т. п. предельный тепловой поток становится зависящим от них, то необходимо рассматривать другую физическую модель горения, в которой скорость горения контролируется скоростями других процессов, например, процесса образования активных продук-

тов, испарения горючих компонентов, диффузии кислорода к поверхности горения и т. п.

Рассмотрим следствия допущения о постоянстве предельного потока \bar{q}_n в рамках предложенной выше модели горения.

При $\bar{q} = \bar{q}_n$ уравнение (5) позволяет установить связь между давлениями потухания p_n и другими параметрами. Подставляя в формулу (5) выражение (1) для критического (предельного) значения длины проникающего пламени, получим

$$p_n/p_s = f(T_0/T_s, \gamma) Y^{-\frac{2-\gamma}{1-\gamma}} (U/U_s)^{-1}, \quad (6)$$

где $l_s = m_s h_s / \omega_s$, а

$$f(T_0/T_s, \gamma) = (\omega/\omega_s)^{-\frac{\gamma}{1-\gamma}} (T_0/T_s)^{\frac{1-\gamma(m+1)}{1-\gamma}} (\bar{q}_s Q / \bar{q}_n Q_s)^{-\frac{1}{1-\gamma}}. \quad (7)$$

Для установления зависимости предельных давлений от теплофизических свойств смазки необходимо найти связь между средним тепловым потоком, необходимым для нагревания и испарения смазки и определенным выше тепловым потоком, генерируемым в зоне горения. Осредненный по длине l тепловой поток, необходимый для поддержания движения изотермической поверхности в слое смазки со скоростью u , будет

$$\bar{q}_c = \bar{\rho}_c u \bar{H}, \quad (8)$$

где $\bar{\rho}_c$ — средняя плотность смазки на участке длиной l ; \bar{H} — средняя на участке длиной l эффективная энтальпия, необходимая для нагревания слоя смазки от T_0 до T_n , включающая в себя теплоту испарения легколетучих компонентов.

Тепловой поток \bar{q}_c представляет собой, с другой стороны, некоторую часть \bar{q} , выделяемого в процессе химических реакций в зоне горения. В теории пограничного слоя показывается, что при увеличении скорости поперечного подвода вещества в пограничный слой тепловой поток, идущий с внешней границы слоя к «испаряющейся» поверхности, уменьшается, но часто принимают [9], что он составляет приблизительно постоянную долю от теплового потока, возникающего в зоне горения, вследствие увеличения количества реагирующего вещества. Одним из следствий пропорциональности \bar{q} и \bar{q}_c является вывод о постоянстве предельного значения \bar{q}_{cn} , а следовательно, и вывод о существовании предельной постоянной скорости распространения горения u_n . Предварительные опыты, проведенные авторами, показывают, однако, что u_n заметно растет с увеличением давления. Для получения зависимости давлений потухания от теплофизических свойств смазки необходим более тщательный анализ течения в пристеночном слое над пленкой горючего как на участке разогрева, так и на участке горения.

Рассмотрим следствия, вытекающие из принятого выше допущения о существовании критического теплового потока, генерируемого в зоне горения, которые не зависят от деталей течения в пристеночном слое над пленкой.

Из формулы (6) получаем, в частности, что в турбулентном режиме

$$p_n = f(T_0) \cdot h^{-0,25} \cdot Y^{-2,25} \cdot U^{-1}, \quad (9)$$

в ламинарном

$$p_n = \varphi(T_0) \cdot h^{-1} \cdot Y^{-3} \cdot U^{-1}, \quad (10)$$

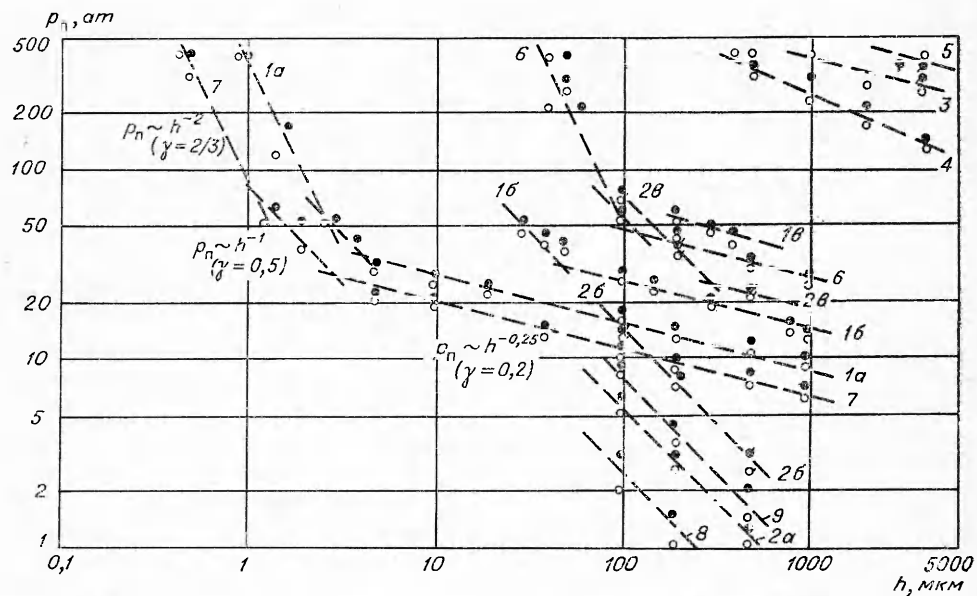


Рис. 2. Влияние толщины пленки на предельные давления, $T_0 = 290$ К, плоский слой. Масло П-28: 1а — $Y=1$; 1б — $Y=0,8$; 1в — $Y=0,5$; смазка ВНИИНП-271: 2а — $Y=1$, 2б — $Y=0,75$, 2в — $Y=0,35$; 3 — смазка ШИПС-02 (ВНИИНП-283); 4 — жидкость ПЭФ; 5 — смазка ШИПС-01; 6 — смазка ВНИИНП-282; 7 — масло промышленное-12; 8 — смазка ВНИИНП-257; 9 — смазка ВНИИНП-274 (для 3–9: $Y=1$). ● — горит, ○ — не горит.

а при $\gamma = 2/3$ (режим смешения, промежуточный между конвективным ламинарным режимом и молекулярной диффузией)

$$p_n = \psi(T_0) \cdot h^{-2} \cdot Y^{-4} \cdot U^{-1}. \quad (11)$$

Формулы (9)–(11) даны для плоского слоя. При горении в трубе величину h надо заменить на hd для малых диаметров труб, в которых пограничные слои смыкаются при $x < l_k$. При толщинах слоя $h > 3$ мм h надо заменить на постоянную величину δ , равную глубине прогрева слоя смазки. На рис. 2 штриховые линии соответствуют зависимостям (9)–(11).

Представляется интересным до построения точной модели горения, позволяющей вычислить коэффициенты f , φ , ψ , произвести сравнение полученных зависимостей с экспериментальными в предположении существования областей, в которых f , φ , ψ постоянны.

Формулы (9)–(11) устанавливают жесткую связь между зависимостью p_n от h и Y через коэффициент γ , определяющий режим горения. Для быстрогорящих смазок, таких как масло промышленное-12, масло П-28, содержащих много легкокипящих компонентов, естественно ожидать турбулентные режимы горения ($\gamma = 0,2$) (скорости горения на пределе для них достигают 1 м/с). Для медленно горящих консистентных смазок (типа ВНИИНП), выполненных на основе фторорганических соединений, более вероятны ламинарные и промежуточные режимы горения ($\gamma = 0,5$ и $0,2 < \gamma < 0,5$) (скорости горения на пределе 1–2 см/с). Например, у масел промышленное-12 и П-28 при $h > 5$ мкм $p_n \sim h^{-0,25}$ (см. рис. 3, а) при фиксированном Y и $p_n \sim Y^{-2,25}$ при фиксированном h (см. рис. 3, а), что соответствует формуле (9). Для консистентных смазок ВНИИНП $p_n \sim h^{-1} \cdot Y^{-3}$ (см. формулу (10)).

Как видно из рис. 2, 3, а, экспериментальные зависимости p_n от Y не всегда точно соответствуют показателю степени $-2,25$ ($\gamma = 0,2$). Однако модель показывает, что увеличение γ должно приводить к более сильной зависимости p_n от Y , а это согласуется с экспериментальными результатами. Наличие областей, в которых $p_n \sim U^{-1}$ и $p_n \sim$

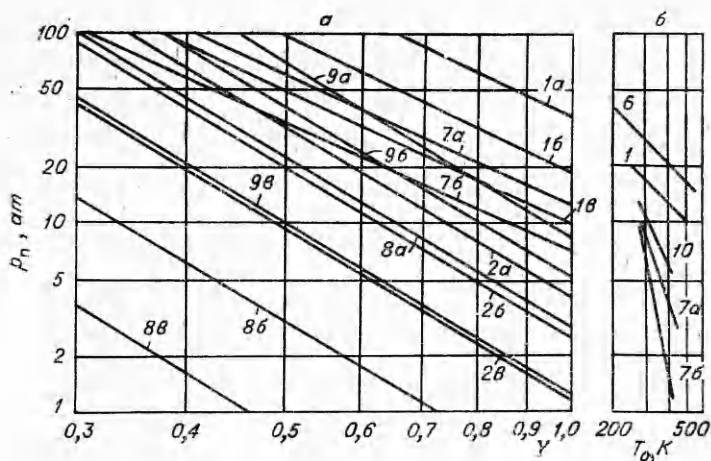


Рис. 3. Влияние начальных концентраций кислорода при $T_0 = -290$ К и начальной температуре (а) и при $Y=1$ (б) на предельные давления.

1, 2, 6-9 — смазки, обозначенные на рис. 2; 10 — масло ВМ-4; Толщина пленки h , мкм (плоский слой) равна соответственно для: а) 1а — 50, 1б — 100, 1в — 500, 2а — 100, 2б — 200, 7а — 100, 7б — 500, 8а — 100, 8б — 200; 8в — 500; б) 1 — 100, 6 — 500, 7а — 100, 7б — 500, 10 — 100.

$\sim d^{-(0,25 \div 1)}$, предсказываемых предложенной моделью, также подтверждается экспериментально. На рис. 4, а видны области, в которых $p_n \sim U^{-1}$, а на рис. 4, б — области, в которых $p_n \sim d^{-0,5}$. Анализ зависимости p_n от T_0 , $f(T_0)$ показывает слабую, неэкспоненциальную зависимость (формула (7) при $m=0,7$, $\gamma=0,5$), что также находится в соответствии с экспериментом (см. рис. 3, б), который дает $p_n \sim T_0^{-(1 \div 3)}$.

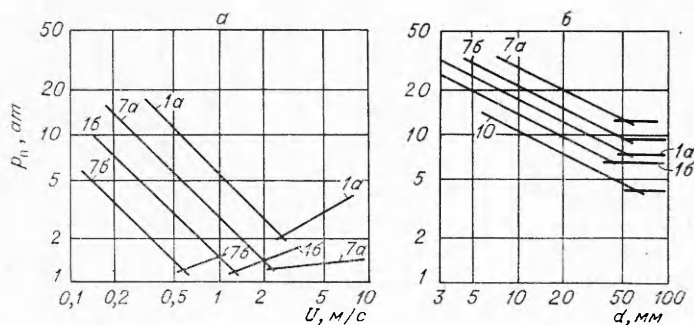


Рис. 4. Влияние скорости потока (а) и диаметра трубы (б) на предельные давления, $T_0 = 290$ К.

1, 7, 10 — смазки, обозначенные на рис. 2 и 3. а) плоский слой, толщина пленки h , мкм: 1а — 50, 1б — 150, 7а — 50, 7б — 500; б) пленка на поверхности трубы, h , мкм: 1а — 50, 1б — 100, 7а — 50, 7б — 150, 10 — 50. Материал поверхности, на которую наносилась пленка смазки, в большинстве опытов — латунь.

Для практических приложений экспериментальные данные о пределах горения смазок были обработаны с использованием полученных зависимостей (9) и (10) численно на ЭВМ по методу максимального правдоподобия [10]. Значения p_n были занижены до величины, соответствующей нижней доверительной границе, на которой вероятность распространения пламени по всей длине слоя смазки составляет 0,01. Для консистентных смазок получено

$$p_n = Ah^{-1}Y^{-3}, \quad (12)$$

для масел

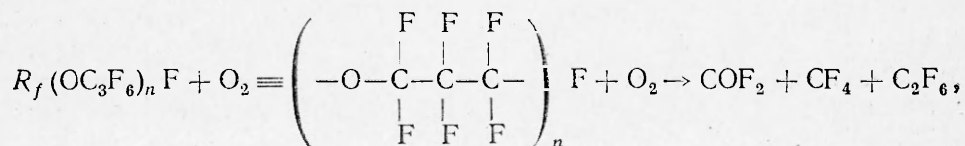
$$p_n = Bh^{-0,25}Y^{-2,25}. \quad (13)$$

Области изменения h, Y	Смазочный материал	Коэффициенты в формулах (12) и (13)
$h=5 \div 3000$ мкм; $Y=0,3 \div 1,0; \gamma=0,2$	Масло промышленное-12	$B=34$
$h=5 \div 3000$ мкм; $Y=0,3 \div 1,0; \gamma=0,2$	Масло П-28	$B=47$
$h=5 \div 1000$ мкм; $Y=0,3 \div 1,0; \gamma=0,5$	Смазка ВНИИ НП-257	$A=250$
$h=5 \div 1000$ мкм; $Y=0,3 \div 1,0; \gamma=0,5$	Смазка ВНИИ НП-271	$A=500$
$h=5 \div 1000$ мкм; $Y=0,3 \div 1,0; \gamma=0,5$	Смазка ВНИИ НП-274	$A=750$

Коэффициенты A и B оказались постоянными (см. таблицу) в широкой области изменения параметров h и Y .

Таким образом, экспериментальные данные по пределам потухания большинства исследуемых смазочных материалов хорошо описываются формулами, полученными на основе разработанной физической модели горения. Модель, основанная на допущении о лимитировании скорости горения диффузией кислорода, привела бы к другой степени зависимости p_n от Y (на единицу меньшей), что не подтверждается экспериментом.

Весьма важен вывод о том, что пределы потухания при рассмотренном механизме горения резко увеличиваются при разбавлении кислорода азотом, но резко уменьшаются с увеличением потока кислорода. Последнее обстоятельство сильно ограничивает области пожаробезопасного применения большинства имеющихся в настоящее время смазок. Исключение составляют жидкость ПЭФ и смазки СК-2, ВНИИ НП-282, выполненные на основе этой жидкости или других полифторированных эфиров, а также смазка ШИПС-02 (ВНИИ НП-283). Пределы горения этих смазочных материалов в отличие от всех других смазок, рассмотренных выше, при наличии потока кислорода, как показывают опыты, выше, чем в неподвижном кислороде. Это означает, что механизм горения этих материалов отличается от рассмотренного выше. Лимитирующим процессом, определяющим скорость горения этих смазочных материалов, является не процесс диффузии активных промежуточных продуктов, а процесс их образования. Например, для жидкости ПЭФ реакция с кислородом лимитируется скоростью разрыва связей С—С. Конечную стадию химической реакции жидкости ПЭФ с кислородом, при которой образуется фторфосген COF_2 , четырехфтористый углерод CF_4 и гексафторэтан C_2F_6 , можно представить в виде



где $n=3 \div 60$.

Механизм горения, при котором лимитирующей является стадия образования активных продуктов, предпочтителен с точки зрения создания смазок, негорючих в широкой области изменения параметров окислителя. В частности, фторированные полиэферы, составляющие основу смазок СК-2 и ВНИИ НП-282, открывают перспективу для создания нового класса пожаробезопасных смазок. Поиск других

основ, скорость горения которых лимитируется скоростью образования активных промежуточных продуктов, представляется также актуальным и перспективным.

Поступила в редакцию
17/III 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. E. Ke hat. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1962, 7, 163.
2. Б. А. Иванов, Н. А. Щепотьев и др. Кислородная промышленность. М., 1973, 1, 3 и 1973, 3, 14.
3. Н. А. Щепотьев, Б. А. Иванов, В. П. Пустовалов.— В сб.: Труды 2-й конференции по процессам горения и проблемам тушения пожаров. М., Стройиздат, 1973, с. 174.
4. Н. А. Щепотьев, Б. А. Иванов.— В сб.: Машины и аппараты кислородных установок. М., «Машиностроение», 1971, вып 13.
5. Б. А. Иванов.— В сб.: Безопасность применения материалов в контакте с кислородом. М., «Химия», 1974, с. 172.
6. Н. Ф. Дубовкин. Справочник по углеродным топливам и их продуктам сгорания. М., ГЭИ, 1962.
7. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1947.
8. Г. Шлихтинг. Теория пограничного слоя. М., ИЛ, 1967.
9. Г. Максмен, К. Вулдридж, Р. Маззи.— В сб.: Гетерогенное горение. М., «Мир», 1967.
10. Б. Л. Вандер Варден. Математическая статистика. М., ИЛ, 1960.

УДК 621.43.019.3

О НЕКОТОРЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ АСПЕКТАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЕТОНАЦИОННОГО РЕЖИМА СГОРАНИЯ

*Д. И. Бакланов, Д. Г. Жимерин, Ю. Н. Киселев,
Э. А. Миронов, В. А. Попов*

(Москва)

Специфические особенности детонационного режима, связанные с распределением параметров продуктов сгорания за детонационным фронтом, позволяют рассмотреть ряд технических аспектов использования этого режима. Представление о детонационном режиме, лежащее в основе созданной детонационной камеры сгорания (ДКС), базируется на теории Зельдовича, как наиболее цельной и приемлемо согласующейся с экспериментальными данными. Несмотря на значительную интенсификацию процесса горения, достигаемую при детонационном режиме, возникают трудности, обусловленные низкой скоростью заполнения камеры сгорания горючей смесью. В работах [1, 2] описаны способы преодоления этого недостатка ДКС, позволяющие перейти от импульсного режима камеры в непрерывный. Авторы не располагают информацией относительно практической реализации упомянутых предложений, вследствие чего затруднительно сделать какие-либо технические определенные суждения.

Сконструированная непрерывно функционирующая ДКС с максимальной частотой до 100 Гц имеет практически неограниченный ресурс работы, определяемый емкостью топливных баллонов. В настоящем сообщении кратко рассматриваются результаты, полученные главным образом при использовании ДКС в качестве устройства для связывания атмосферного азота и магнетогидродинамического генератора электрической энергии.