

$x = -\infty$ вдоль асимптотики решений. В задаче (18) есть дополнительный элемент: нужно выполнить условие $a(+\infty) = 1$ за счет выбора ω . Это легко достигается методом проб.

Область применимости описанного здесь приближенного решения задачи оказывается достаточной, чтобы восполнить пробелы численного метода решения общей задачи, изложенного выше.

*Поступила в редакцию
20/VI 1968*

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. И. Хайкин, А. К. Филоненко, С. И. Худяев. ФГВ, 1968, 4, 4.
2. Y. B. Zeldovich, G. I. Vagenblatt. Comb. and Flame, 1959, 3, 61.
3. С. К. Годунов, В. С. Рябенский. Введение в теорию разностных схем. М., Физматгиз, 1960.
4. Р. Д. Рихтмайер. Разностные методы решения краевых задач. ИЛ, 1960.
5. В. Ф. Баклановская, А. Д. Кутасов, М. Г. Нейгауз. Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 1961, 1, 2.

УДК 662.767+536.46

К ВОПРОСУ ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНГИБИТОРОВ ПРИ ГОРЕНИИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ

И. М. Абдурагимов, Г. Я. Дриккер

(Москва)

Эффективность ингибиторов горения в значительной степени определяет надежность систем противопожарной и противовзрывной защиты, применяемых во многих областях техники.

Однако имеющиеся в настоящее время литературные данные по химическому ингибированию горения и особенно по механизму этого процесса совершенно недостаточны ни для понимания и объяснения ряда встречающихся на практике явлений, связанных с процессами горения и гашения пламени, ни для расчета и проектирования конкретных технических устройств, предназначенных для гашения пламени и подавления взрыва.

Сравнительно ясен тепловой механизм действия на пламя нейтральных газов [1], но использование их для ряда технических устройств неприемлемо вследствие весьма малой эффективности. Большой научный и практический интерес представляют химические соединения, введение которых в небольших количествах в зону пламени оказывает существенное влияние на процесс горения [2].

Однако создание новых высокоэффективных огнегасительных составов, проектирование конкретных систем с применением активных ингибиторов и прогнозирование их эффективности в широком диапазоне начальных и граничных условий очень затруднено из-за отсутствия

необходимых знаний об элементарных химических процессах, происходящих при взаимодействии ингибитора с промежуточными продуктами реакции или с горючей смесью в предпламенной зоне. Поэтому наряду с исследованиями, позволяющими частично вскрыть механизм гашения, оказывается необходимым экспериментальное определение фактической эффективности ингибиторов в каждом конкретном случае.

Исходя из общих положений о механизме действия активных ингибиторов [3] и учитывая наиболее высокую эффективность бром- и фторсодержащих предельно замещенных соединений парафинового ряда, для гашения пламен авиационных углеводородных топлив был предложен в качестве гасящего вещества тетрафтордибромэтан $C_2F_4Br_2$; высокая ингибирующая эффективность которого была подтверждена экспериментами.

Основные физико-химические характеристики тетрафтордибромэтана (усл. обозначение F114B₂); молекулярный вес $M=260$, плотность $\rho=2,18 \text{ г/см}^3$, температура кипения 46°C .

Огнегасящая концентрация тетрафтордибромэтана была исследована несколькими взаимно дополняющими друг друга методами.

В качестве топлива были использованы бензин Б-70 и промышленный пропан (чистоты 92%-95%). Все эксперименты первой и второй серии опытов проводились при нормальных начальных температурах и барометрическом (атмосферном) давлении.

1. Методом бунзеновской горелки была установлена зависимость падения нормальной скорости распространения пламени v_n от количества ингибитора, добавляемого в гомогенную горючую топливно-воздушную смесь. Эксперименты велись с пропано-воздушной смесью на горелке с внутренним диаметром 10 мм в условиях ламинарного потока. Расчет скорости производился по площади видимого конуса пламени.

Результаты экспериментов представлены в виде графика зависимости $v_n = f(\varphi)$. Здесь и в дальнейшем φ — концентрация топлива, отнесенная к стехиометрической концентрации. Гасящие концентрации ингибитора определялись предельными значениями v_n , при которых

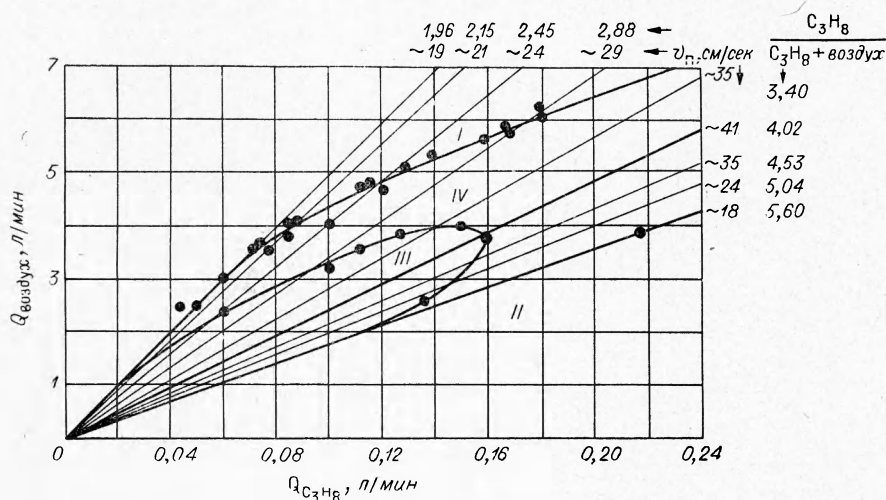


Рис. 1. Концентрационные пределы пропано-воздушного пламени на бунзеновской горелке.

I — область бедного срыва; II — область богатого срыва (при изоляции пламени от атмосферного воздуха нейтральным газом или пламяразделителем); III — область проскока пламени; IV — область устойчивого горения.

происходит срыв пламени с устья горелки. По результатам этой серии опытов были проанализированы возможные причины срыва пламени при введении добавки.

Установлено, что полученные на бунзеновской горелке концентрационные пределы распространения пламени (рис. 1), иначе говоря, концентрации ингибитора, при которых происходит срыв пламени, сильно зависят от скорости газового потока в устье горелки (или от расхода газовой смеси). Снижением скорости потока горючей смеси удалось свести к минимуму эту «газодинамическую» причину срыва пламени. При расходе стехиометрической пропано-воздушной смеси 6 л/мин ($v_{\text{п макс}} = 41 \text{ см/сек}$) для срыва пламени достаточно снизить максимальную скорость распространения пламени всего на 10—12 см/сек (см. рис. 1), тогда как при расходе 3 л/мин скорость распространения пламени надо снизить на 20—22 см/сек. Уменьшение же расхода горючей смеси ниже 4 л/мин вызывает экспериментальные трудности, обусловленные проскоком пламени внутрь горелки. Поэтому эксперименты велись в узкой зоне устойчивого горения между кривыми срыва и проскока пламени.

При введении в горючую смесь добавок максимум нормальной скорости распространения пламени сдвигается в сторону бедных смесей. Например, при добавлении 24% Ar в пропано-воздушную смесь максимум сдвигается от $\varphi = 1,0$ к $\varphi = 0,7$ (рис. 2). Аналогичный сдвиг имеет место при добавлении 13% CO_2 . Такое смещение положения максимума $v_{\text{п}}$ приводит к изменению величины скорости распространения пламени при заданной концентрации топлива еще на 8—10% помимо собственного действия добавки.

Учет и этого обстоятельства позволил с достаточной точ-

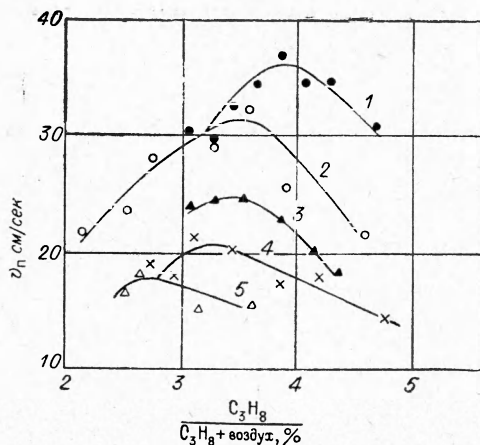


Рис. 2. Влияние добавок аргона на нормальную скорость распространения пламени пропано-воздушной смеси.

Ar, %: 1 — 4; 2 — 9,4; 3 — 15,4; 4 — 20; 5 — 24.

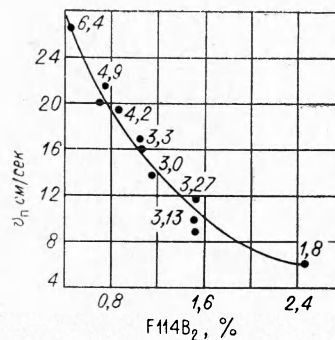


Рис. 3. Зависимость скорости распространения пропано-воздушного пламени от процентного содержания добавок тетрафтордибромэтана (при различных суммарных расходах смеси).

ностью выявить собственное действие добавляемого вещества на скорость распространения пламени. Поэтому при определении ингибирующего влияния добавок на процессы горения методом бунзеновской горелки правильное вести эксперимент не на стехиометрических смесях (как это делают большинство исследователей [4] и др.), а на смесях состава, соответствующего максимуму скорости для данного вида горючего и ингибитора.

Зависимость $v_{п}$ от процентного содержания добавки представлена на рис. 3. Цифры на кривой рис. 3 означают скорости потока, при которых происходит срыв пламени. На рис. 4 представлены графики зависимости скорости распространения и срыва пламени с устья горелки от процентного содержания добавок нейтральных разбавителей

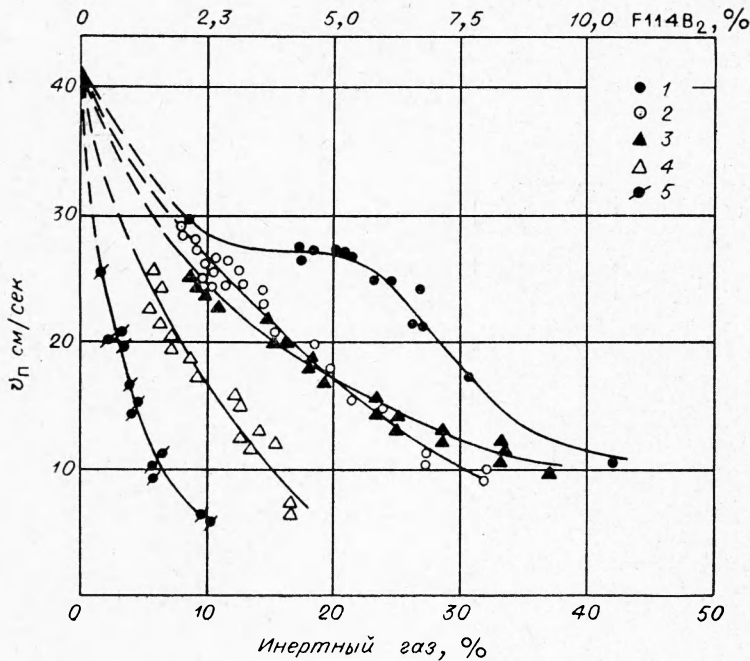


Рис. 4. Зависимость скорости срыва пламени пропано-воздушной смеси ($\varphi=1,15$) от процентного содержания добавок при различных суммарных расходах смеси.
1 — He; 2 — N₂; 3 — Ar; 4 — CO₂; 5 — F114B₂.

и активного ингибитора — тетрафтордибромэтана. Более высокая эффективность химически активного ингибитора по сравнению с нейтральными газами очевидна. Предельные огнегасящие добавки тетрафтордибромэтана, равные 200—250 мг на 1 л газовой смеси, были получены при значениях $v_{п} = 6—7$ см/сек.

2. Приведенные выше результаты хорошо согласуются с концентрационными пределами области воспламенения топливно-воздушных смесей в присутствии ингибиторов. Концентрационные пределы воспламенения смесей были определены методом бомбы постоянного объема. Опыты велись на шаровой 8-литровой бомбе постоянного объема. Давление сгорающей смеси регистрировалось с

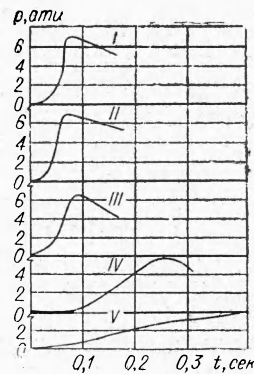


Рис. 5. Осциллограммы роста давления при сгорании пропано-воздушной смеси в замкнутом объеме при добавлении тетрафтордибромэтана.

I — чистая смесь (воспламенение от свечи); II — чистая смесь (воспламенение от пропано-воздушной смеси); III — добавка 0,3% фреона; IV — добавка 0,9% фреона; V — добавка 2% фреона.

точностью 0,01—0,02 *ати* малоинерционными датчиками на осциллографе К-12.

Характер роста давления при сгорании смеси и его максимальная величина обусловлены влиянием ингибитора на горючие свойства смеси (рис. 5).

Зависимость максимального давления взрыва ряда топливно-воздушных смесей от процентного содержания $C_2F_4Br_2$ (рис. 6) представляет из себя прямую, отсекающую на оси абсцисс взрывопредотвращающую концентрацию ингибитора. Ингибированная топливно-воздуш-

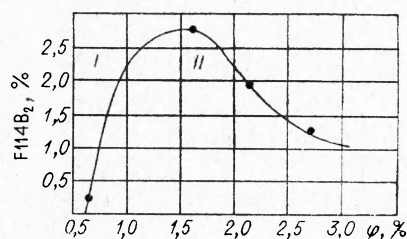
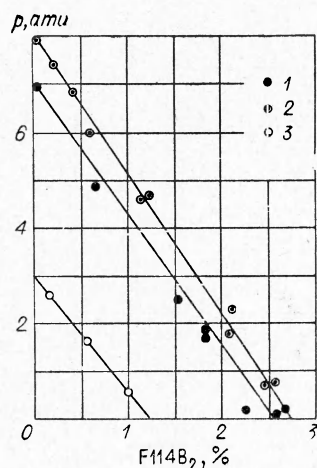


Рис. 7. Область воспламеняемости тройной смеси бензин — воздух — тетрафтордибромэтан ($t=20^\circ C$, $p_{взр} < 0,2 \text{ ати}$)

I — область невоспламеняемой смеси, II — область воспламеняемой смеси.

Рис. 6. Зависимость давления взрыва бензино-воздушных смесей от процентного содержания тетрафтордибромэтана при температуре $20^\circ C$.

1 — $\varphi = 1,15$; 2 — $\varphi = 1,65$; 3 — $\varphi = 2,7$.

ная смесь, концентрационный состав которой находится выше кривой воспламенения (рис. 7), является взрывобезопасной. Последняя воспламеняемая смесь приходится на $\varphi_{\text{бенз}} = 1,65$ и концентрацию $C_2F_4Br_2$, равную 2,7%.

Необходимо отметить, что состав наиболее трудно ингибируемой горючей смеси существенно отличается от стехиометрического, а положение пика воспламеняемости по φ соответствует концентрации топлива, при которой происходит максимальное давление взрыва в чистой топливно-воздушной смеси. Например, для бензина эта величина равна 1,65 (см. рис. 7). Из результатов экспериментов, представленных на рис. 1—5, следует, что пропано-воздушные смеси не горят при концентрациях добавки ингибитора порядка 2—2,5%, что составляет приблизительно 200—250 мг ингибитора на 1 л смеси. Однако истинные значения концентраций ингибирующей добавки $C_2F_4Br_2$, делающие эту смесь совершенно негорючей и взрывобезопасной, значительно выше. Они составляют 350—400 мг на 1 л газовой топливно-воздушной смеси.

Все результаты экспериментов вблизи от границы воспламенения были получены с применением оригинального метода совмещения бомбы постоянного объема с бомбой постоянного давления. На конце помещенной в бомбу эбонитовой трубки, внутри которой находилась запальная свеча, чистой пропано-воздушной смесью выдувался мыльный пузырь диаметром 3—4 см. Сферическое пламя чистой топливно-воз-

душной смеси в мыльном пузыре выполняло функции «усилителя» источника воспламенения. Погрешности, вносимые влагой, содержащейся в мыльной пленке (и существенные лишь при опытах с СО), и приростом давления за счет сгорания пропано-воздушной смеси, оказались незначительными (менее 0,1 *ати*).

Интенсивность же такого источника воспламенения оказалась достаточной для воспламенения таких ингибированных смесей, которые не воспламенялись при искровом зажигании даже при очень высокой мощности искры. При взрыве этих смесей по методу зажигания от мыльного пузыря регистрировался рост давления в пределах до 1,0 *ати*. Энергия, необходимая для зажигания таких смесей, настолько велика, что их воспламенить не удавалось обычной электрической свечой даже при очень больших значениях мощности электрической искры. Тем не менее их нельзя признать взрывобезопасными в полном смысле этого слова, так как они могут взрываться при достаточно большой мощности источника зажигания.

Примененный метод исключает возможность подобной ошибки и дает значения истинных огнегасящих и взрывопредотвращающих концентраций ингибитора, полностью предотвращающих воспламенение во всем диапазоне концентраций топливно-воздушных смесей при любой мощности источника зажигания.

Третья серия экспериментов была проведена по этой же методике при начальных температурах топливно-воздушных смесей в диапазоне 20—150° С. Эксперименты велись с целью определения взрывопредотвращающей концентрации тетрафтордибромэтана при введении его в гомогенные топливно-воздушные смеси различных углеводородных топлив: Б-70, Б-100, различных марок керосина и других авиационных топлив.

Полученные значения концентраций не превышали 400-450 *мг/л*, что и было принято в качестве расчетного значения для разработки конкретных систем. В настоящее время тетрафтордибромэтан стал основным огнегасящим составом в различных областях техники.

Поступила в редакцию
27/VIII 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Н. Хитрин. Физика горения и взрыва. М., Изд. МГУ, 1957; Coward, E. Jones. U. S. Bur. Min. Bull. 1952, 503.
2. Friedman, Grover. Ind and Eng. Chem., 1961, 53, 12; Ind. and Eng. Chem., 1957, 49, 9; Rosser, Wise, Miller. 7-th Symposium (International) on Combustion, London, 1959.
3. Cullis, Fish, Ward. Combustion and Flame, 1963, 7, 3; Fish Combustion and Flame, 1964, 8, 1; В. М. Кучер. Инф. сб. «Пожарная профилактика и тушение пожаров». Вып. 2, 1964.
4. Lask, Wagner. 8-th Symposium (International) on Combustion, Baltimore, 1962.