

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМОВ ДЕЙСТВИЯ ИНГИБИРУЮЩИХ И ФЛЕГМАТИЗИРУЮЩИХ ОГНЕТУШАЩИХ СОСТАВОВ

Журов М.М.

Цель. Проанализировать теоретические аспекты механизмов действия ингибирующих и флегматизирующих огнетушащих составов.

Методы. Аналитический, сравнительная оценка механизмов действия ингибирующих и флегматизирующих составов.

Результаты. Сопоставительный анализ теоретических аспектов механизмов действия ингибирующих и флегматизирующих составов. Показана энергетическая взаимосвязь химической реакции горения с тепловой теорией потухания. Обобщены значения энергий разрыва связей для некоторых горючих молекул и их радикалов. Сопоставлены стандартные энергии разрыва химических связей галогенпроизводных предельных углеводородов и их огнетушащая эффективность, что свидетельствует о взаимосвязи их природы с огнетушащим действием.

Область применения исследований. Современные подходы к разработке огнетушащих составов целевого назначения. Разработка инновационных материалов и технологий.

Ключевые слова: ингибирующие и флегматизирующие составы, тушение пожаров, механизмы действия, радикалы, радикально-цепной механизм, энергия химической связи.

(Поступила в редакцию 5 апреля 2023 г.)

Введение

В настоящее время известны две теории процессов горения: радикальная [1] и тепловая [2]. Протекание реакции горения имеет сложный механизм. Этот радикально-цепной механизм горения в кислороде был открыт и описан советским ученым Н.Н. Семеновым [3], который повторил и подтвердил эксперимент советского ученого Ю.Б. Харитона. Ими обосновано развитие цепных реакций горения посредством образования активных частиц – радикалов. Но не дается обоснования взаимосвязи образования радикалов с действием ингибирующих и флегматизирующих огнетушащих составов, которые с точки зрения энергетических процессов напрямую определяют как скорости образования радикалов, так и протекание процесса горения. Горение газов, легковоспламеняющихся жидкостей и твердых горючих материалов на пожарах с учетом агрегатного состояния компонентов горючей смеси может быть гомогенным или гетерогенным. Для прекращения гомогенного (пламенного) горения газов, легковоспламеняющихся жидкостей и твердых горючих материалов особенно важно создать условия для прекращения процесса образования радикалов. Образование радикалов, в свою очередь, является высокоэнергетическим процессом, который связан с энергией разрыва химических связей молекул. Поэтому для прекращения горения также важно понимать условия и суть процесса разрыва химических связей в условиях пожара.

Основная часть

Энергия активации реакции горения не влияет на ее тепловой эффект, который определяется только начальным и конечным состоянием системы. Тепловой эффект химической реакции Q не зависит от величины энергии активации E , т.е. от того, по какому механизму происходит реакция, а зависит только от начального и конечного состояния системы. Тепловая теория потухания также основывается на энергетических законах (рис. 1), связь которых представляет особый интерес.



E – энергия активации; Q – тепловой эффект реакции; E' – конечное энергетическое состояние системы, q^+ – количество выделяющегося тепла; q^- – количество отводимого тепла; T_0 – начальная температура; T_r – температура горения (т. 1); $T_{пот}$ – температура потухания (т. 2)

Рисунок 1. – Влияние огнетушащих составов на процессы тепловыделения и теплоотвода в зоне реакции горения

Ингибирующие и флегматизирующие огнетушащие составы в соответствии с тепловой теорией потухания (рис. 1) понижают температуру в зоне пламенного горения до температуры потухания, при этом важно понимать их влияние на исходные реагенты химической реакции. Их введение в зону горения приводит к уменьшению тепловыделения q^+ и увлечению теплоотвода q^- , что позволяет снизить температуру в зоне горения от значений т. 1 (температура горения) до значений т. 2 (температура потухания). В процессе физико-химической реакции горения происходит разрыв одних и образование других химических связей. Поэтому энергия химической связи атомов в молекулах горючих веществ является важным критерием при разработке средств для тушения пожаров, т.к. ее разрыв обуславливает дальнейшее протекание реакции горения и, как следствие, образование продуктов реакции горения. В теоретическом аспекте физическая энергия химической связи в молекуле определяется количеством энергии, которую необходимо затратить, чтобы разделить ее на две части и удалить их друг от друга на бесконечное расстояние. Стандартной энергией разрыва химической связи называют изменение энтальпии при химической реакции, в которой происходит разрыв данной связи в одном моле вещества. Энергии разрыва связей в некоторых горючих молекулах и их радикалах представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Энергии разрыва химических связей горючих молекул и их радикалов [4]

Соединения	ккал/моль	кДж/моль
H–H	104	436
C ₂	145,8	610
C–C	78	410
C=C	140	585
C≡C	193	808
C–C (графит, газ)	171	715
C–H	98	410
HC–H	101	424
H ₂ C–H	110	462
H ₃ C–H	105	438
H–nC ₃ H ₇	101	423
H–iC ₃ H ₇	98	409
H–CCH	132	556
H ₃ C–CH ₃	90	376
H ₅ C ₂ –H	101	423

Из таблицы 1 видно, что энергия химической связи С–Н в молекулах и радикалах в зависимости от их строения изменяется в диапазоне от 410 до 556 кДж/моль. Также в зависимости от природы соединения значение энергии химической связи С–Н изменяется в диапазоне от 290 до 420 кДж/моль [5, с. 269]. Поэтому для прекращения пламенного горения энергию в зоне горения необходимо понизить до значений 290 кДж/моль для предотвращения воспламенения атомов углерода, входящих в состав горючих паров различных молекул.

Для сопоставления значений энергии разрыва связей в горючих молекулах рассмотрим энергии разрыва связей в следующих молекулах и радикалах, участвующих в процессе тушения пламенного горения: O_2 , H_2O , $H-O\cdot$, $H-Cl$, $H-Br$, $H-I$ (представлены в таблице 2).

Таблица 2. – Энергия разрыва химических связей негорючих молекул и кислорода [4]

Соединения	ккал/моль	кДж/моль
O–O	119	498
HO–H	118	495
H–O·	104	435
H–F	136	570
H–Cl	103,0	432
H–Br	87,5	340
H–I	71	298
H ₃ C–F	113	472
H ₃ C–Cl	88	370
H ₃ C–Br	70	292
H ₃ C–I	50	209
H–CH ₂ F	101	423
H–CH ₂ Cl	100	419
H–CH ₂ Br	102	425
H–CH ₂ I	103	431
F–F	38	158,8
Cl–Cl	58	242,6
Br–Br	46	192,8
I–I	36	151,1

Сопоставление данных таблиц 1 и 2 показывает, что значения энергий разрыва связей в рассмотренных галогенпроизводных предельных углеводородах меньше, чем значения энергий разрыва связей в горючих молекулах. Это согласуется с эффективностью огнетушащего действия галогенпроизводных, т.к. при их введении в зону горения скорость образования радикалов, обрывающих радикальные цепные реакции окисления, будет больше, чем скорость образования радикалов, поддерживающих зарождение и продолжение цепных реакций окисления. Значения энергий связи $E_{св}$ галогенпроизводных предельных углеводородов уменьшаются в следующей последовательности:

$$E_{св}(F) > E_{св}(Cl) > E_{св}(Br) > E_{св}(I).$$

Поэтому для эффективного тушения пожаров важно также учитывать как природу, так и механизмы действия огнетушащих веществ.

Применение ингибиторов и флегматизаторов для тушения пожаров тем или иным способом влияет на процессы тепловыделения и теплоотвода и приводит к уменьшению скорости горения вплоть до полного его прекращения. В каждом случае тушение достигается за счет снижения температуры в системе ниже температуры потухания. Далее с целью исключения повторного воспламенения необходимо понизить температуру горючих веществ и материалов до температуры воспламенения.

Под температурой самовоспламенения понимается минимальная температура горючей смеси, при которой начинается резкое ускорение химической реакции окисления, приводящее к пламенному горению. В условиях пожара воспламенение поступающих в зону горения паров и газов происходит от пламени и горение может начинаться при температуре воспламенения. Под температурой воспламенения понимается самая низкая (в условиях специальных испытаний) температура горючего вещества, при которой оно выделяет горючие пары или газы с такой скоростью, что после воспламенения их от источника зажигания возникает устойчивое диффузионное горение. Значения температур воспламенения и самовоспламенения некоторых веществ и материалов представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Температуры воспламенения и самовоспламенения веществ и материалов [6; 7]

Вещество / материал	Температура воспламенения / самовоспламенения, °С	Агрегатное состояние
Водород	- / 510	газ
Оксид углерода (II)	- / 610	газ
Этан	- / 472	газ
Пропан	- / 466	газ
Бутан	- / 405	газ
Этилен	- / 540	газ
Ацетилен	- / 335	газ
Ацетон	-20 / 535	жидкость
Этиловый спирт	15 / 400	жидкость
Глицерин	203 / 400	жидкость
Нефть	27 / 310	жидкость
Бензин	-27 / 380	жидкость
Дизельное топливо	55 / 300	жидкость
Бумага	233 / 450	твердый
Войлок	287 / 370	твердый
Древесина сосновая	255 / 370	твердый
ПВХ	391 / 454	твердый

Примечание. Значения температур некоторых сложных веществ и материалов могут отличаться от значений, приведенных в других литературных источниках, что обусловлено различием их химических составов.

Анализ значений температур воспламенения и самовоспламенения показывает, что при отсутствии источника зажигания для успешного тушения и предотвращения повторного воспламенения необходимо понизить температуру в зоне реакции ниже температуры самовоспламенения, которая для большинства газоздушных смесей находится в диапазоне 300–600 °С.

Тепловая теория горения рассматривает механизм самопроизвольного распространения горения и количественно определяет взаимосвязь между нормальной скоростью горения и такими параметрами, как температура горения, скорость химической реакции, скорость теплообмена между продуктами реакции и исходной горючей смесью. При этом количество выделяющегося тепла при горении q^+ пропорционально скорости химической реакции и зависит от температуры по экспоненциальному закону [8, с. 54]:

$$q^+ = QW = Q \cdot k_0 C_r^{n_r} C_0^{n_0} e^{-\frac{E}{RT}},$$

где Q – тепловой эффект химической реакции, Дж/моль;

W – скорость химической реакции, моль/с;

k_0 – предэкспоненциальный множитель, м⁶/(моль²·с);

$C_r^{n_r}$ и $C_0^{n_0}$ – концентрации горючего и окислителя с учетом порядков реакции по компонентам, моль/м³;

E – энергия активации химической реакции, Дж/моль;
 R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);
 T – температура, К.

Уравнение показывает математическую и физическую взаимосвязь количества выделяющегося тепла от температуры. При этом с возрастанием начальной температуры увеличивается температура горения смеси, о чем свидетельствует уравнение [8, с. 24]:

$$T_r = T_0 + \frac{Q_n}{\sum_{i=1}^n c_{p_i} N_{\text{пр}_i}},$$

где T_0 – начальная температура, К;

Q_n – низшая теплота сгорания, Дж;

c_{p_i} – средняя молярная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(моль·К);

$N_{\text{пр}_i}$ – количество продуктов горения, моль.

Следовательно, при увеличении начальной температуры горения T_0 скорость химической реакции окисления W экспоненциально увеличивается, а значит, увеличивается и скорость горения U_n (рис. 2).

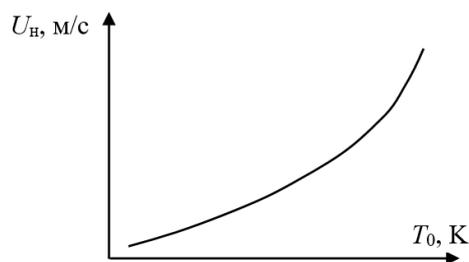


Рисунок 2. – Влияние начальной температуры на скорость распространения пламени

Тепловая теория потухания основывается на энергетических законах, на основании которых для прекращения горения необходимо снизить температуру в зоне химической реакции до температуры потухания, равной 1000 °С. Согласно тепловой теории потухания пламени, разработанной Я.Б. Зельдовичем [8], Д.А. Франк-Каменским [2], Л.А. Вулисом [9], В.И. Блиновым [10] и другими советскими учеными, снижение температуры в пламени до температуры потухания достигается за счет нарушения теплового баланса в зоне химической реакции путем:

- снижения интенсивности тепловыделения до предельного значения, ниже которого невозможно продолжение реакции;
- повышения интенсивности теплоотвода;
- одновременного снижения интенсивности тепловыделения и повышения интенсивности теплоотвода.

В условии пожара наличие в зоне горения флегматизаторов и ингибиторов приводит одновременно к снижению интенсивности тепловыделения и повышению интенсивности теплоотвода. Введение флегматизаторов и ингибиторов снижает концентрацию кислорода и активных радикалов в зоне горения, их введение в горючую смесь приводит к увеличению ее температуры самовоспламенения. Такой подход позволяет предположить, что температура потухания по своей сути и физическому смыслу – это и есть температура, значение которой стремится к температуре самовоспламенения в присутствии флегматизаторов и ингибиторов. С учетом этого достижение значений температуры потухания для каждого конкретного горючего вещества зависит от природы и параметров их введения. Таким образом, процесс взаимного влияния механизмов действия ингибиторов и флегматизаторов в процессе тушения представляет весьма большой как научный, так и практический интерес.

Тушение пожаров с помощью ингибирующих и флегматизирующих составов достигается за счет таких способов, как: разбавление реагирующих веществ, охлаждение зоны горения или горящего материала; торможение химической реакции горения путем повышения $E_{\text{акт}}$.

Применение ингибирующих составов приводит к снижению энергии в зоне горения ниже энергетического барьера активации горючих веществ, что достигается прежде всего за счет взаимодействия с активными частицами (радикалами) в газовой фазе. Флегматизирующие составы снижают концентрацию кислорода до значений, при которых горение становится невозможным. Поэтому флегматизаторы должны вводиться непосредственно через зону поступления кислорода, а ингибиторы – через зону поступления горючего вещества. В условиях реальных пожаров для этого необходимо правильно сочетать приемы введения, чтобы максимально снизить их расход и повысить эффективность тушения.

В научных исследованиях зарубежных и отечественных ученых раскрываются основные свойства и механизмы действия ингибирующих и флегматизирующих огнетушащих составов. Принципиальное отличие механизмов действия ингибирующих и флегматизирующих огнетушащих составов заключается в том, что применение ингибиторов приводит к обрыву цепных реакций горения в результате их взаимодействия в зоне горения с активными радикалами. Механизм действия флегматизирующих составов сводится к снижению содержания кислорода и горючих паров и газов в зоне горения и к увеличению теплоотвода, сопровождающимся понижением температуры.

Флегматизаторы в процессе отвода теплоты из зоны реакции окисления могут также ее поглощать и на эндотермические превращения. В первом случае при снижении температуры в системе до значений ниже температуры потухания горение прекращается, и этот процесс сопровождается увеличением запаса физического тепла флегматизаторов. Во втором случае понижение температуры горения происходит еще и за счет эндотермических превращений, протекающих в зоне пламени.

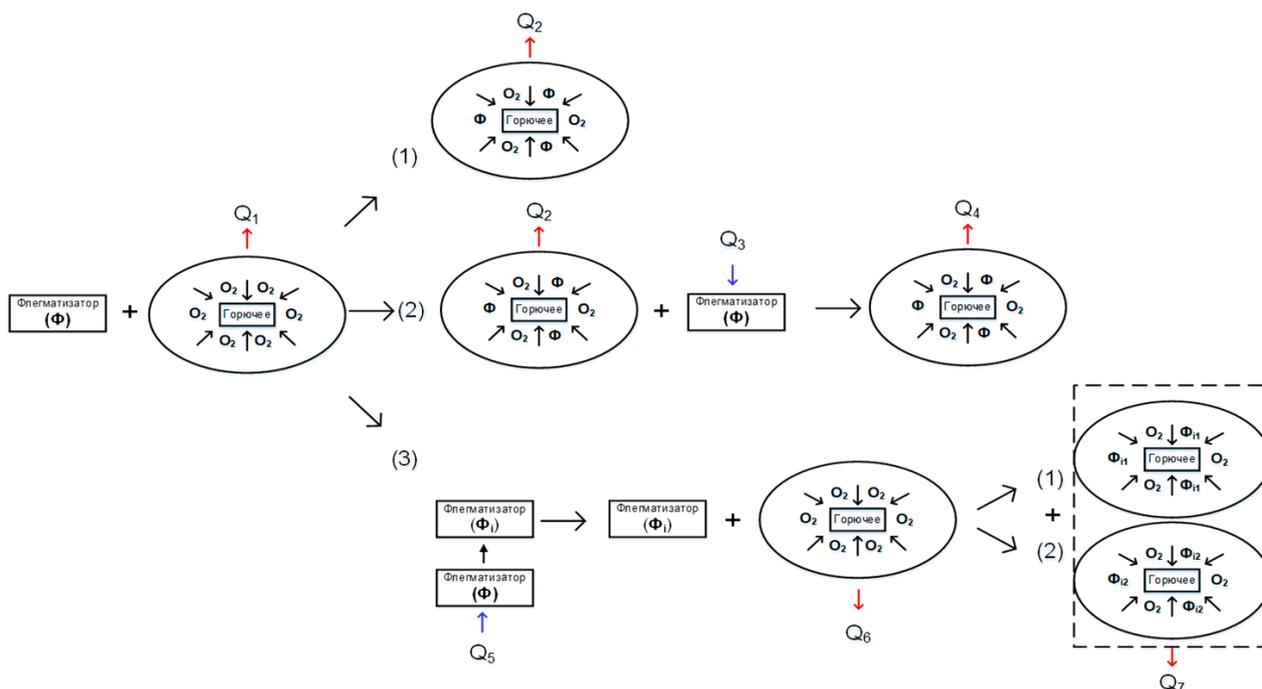
Из класса таких тепловых флегматизаторов чаще всего применяются CO_2 , H_2O , N_2 . Их введение в зону горения позволяет снижать концентрацию кислорода и горючих паров и газов, что приводит к снижению скорости горения. Флегматизаторы характеризуются огнетушащей концентрацией – минимальной концентрацией флегматизатора в смеси с воздухом, обеспечивающей практически мгновенное тушение диффузионного пламени горючего вещества.

Физико-химический анализ огнетушащих концентраций основных флегматизаторов показал, что сложные соединения, распадающиеся в пламени, способны флегматизировать горение уже в значительно меньших концентрациях, чем инертные добавки [12, с. 88]. На рисунке 3 предложена схема обобщенного энергетического механизма действия тепловых флегматизаторов.

Значения тепловых эффектов Q_1 – Q_7 зависят от природы и свойств флегматизаторов, вводимых в пламенную зону горения.

Механизм флегматизации по варианту 1 (рис. 3) приводит к уменьшению тепловыделения из зоны горения с величины Q_1 до значений Q_2 за счет снижения концентрации кислорода в зоне реакции. При этом происходит уменьшение тепловыделения из зоны горения в основном за счет уменьшения скорости химических реакций. Флегматизация по варианту 2 приводит к уменьшению тепловыделения из зоны горения с величины Q_1 до значений Q_4 как за счет уменьшения скорости химических реакций, так и за счет отвода тепла из зоны горения посредством нагрева самого флегматизатора. Такой механизм действия характерен для трехатомных соединений, которые по сравнению с двухатомными лучше отводят тепло, т.к. их теплосодержание при фиксированной температуре больше. Поэтому для двухатомных соединений более характерен механизм флегматизации по первому варианту, для трехатомных – по второму. Вариант 3 приводит к уменьшению тепло-

выделения из зоны горения с величины Q_1 до значений Q_7 еще и за счет эндотермических реакций распада исходных веществ на другие флегматизирующие вещества.



Q_1 – Q_4 , Q_6 , Q_7 – тепловые эффекты реакции; Q_5 – эндотермический тепловой эффект; O_2 – кислород; Φ – флегматизатор; Φ_i – флегматизаторы, образующиеся в результате эндотермических превращений

Рисунок 3. – Схема (концентрационно-энергетическая) обобщенного энергетического механизма действия тепловых флегматизаторов

Действие горючих флегматизаторов имеет более сложную природу. Как и инертные добавки, они не оказывают специфического химического влияния на реакцию в пламени и только понижают температуру горения [12, с. 88], но сильнее, чем негорючие флегматизаторы, снижают концентрацию горючих паров и газов в зоне продуктов горения. На основании обобщенного энергетического механизма действия флегматизаторов (рис. 3) можно предположить, что эффективность их действия при введении в зону пламени может значительно снижаться ввиду влияния возникающих конвективных потоков. Поэтому приемы введения флегматизаторов должны обеспечивать максимальное проявление их огнетушащих свойств. Например, тушение с помощью тонкораспыленной воды, когда за счет отвода тепла из зоны горения (численно равного Q_5) происходит за счет гетерофазного перехода воды в парообразное состояние, является примером механизма действия, описанного в варианте 2 (рис. 3). При этом в области, которая находится выше области парообразования, также происходит уменьшение скорости процесса горения за счет разбавления горючей смеси и снижения концентрации кислорода. Кроме того, можно предположить, что до момента перехода в парообразное состояние распыленная вода может уменьшать количество активных радикалов в зоне пламени за счет гетерогенного ингибирования. Поэтому для подавления пламенного горения и повышения эффективности флегматизации горючих паров и газов водяным паром параметры ее подачи должны способствовать парообразованию непосредственно вблизи поверхности горения и в нижней части зоны пламени, а дисперсность распыленной воды должна быть такой, чтобы весь объем подаваемой воды максимально переходил в пар.

Действие ингибирующих составов по сравнению с флегматизирующими позволяет эффективнее уменьшать количество активных центров цепного процесса горения и тем самым снижать температуру в зоне реакции, что также способствует подавлению горения вплоть до его полного прекращения. При этом ингибирование бывает гомогенным (хладо-

ны) и гетерогенным (неорганические соли). Проявление гомогенного ингибирования наблюдается главным образом в парогазовой фазе. Существует несколько точек зрения на процесс ингибирования пламени. Гашение пламени за счет гомогенного ингибирования происходит при взаимодействии ингибитора с активными частицами, поступающими в зону пламени [13]. Гашение пламени за счет гетерогенного ингибирования заключается во взаимодействии радикалов и атомов с твердой поверхностью ингибиторов [14; 15]. Наиболее полно процессы в реальных системах отражает точка зрения, которая допускает как гомогенное, так и гетерогенное ингибирование пламени. Происходит либо рекомбинация активных частиц на твердой поверхности активных компонентов, либо гомогенное взаимодействие газообразных продуктов возгонки порошков с активными центрами [16, с. 16].

Ингибиторы конкурируют с окислителем во взаимодействии с активными центрами цепной реакции. В результате более высокого, чем у кислорода воздуха, химического сродства к активным промежуточным продуктам реакции окисления, молекулы ингибитора энергично реагируют с активными центрами, превращая их в устойчивые соединения и прерывая развитие цепной реакции горения. Прерывание цепной реакции, в свою очередь, уменьшает тепловыделение из зоны горения.

Наиболее эффективными гетерогенными ингибиторами горения являются оксалат калия и хлориды щелочных металлов. В целом ингибирующая эффективность солей повышается с увеличением атомной массы катиона. Анион соли также усиливает действие вещества путем выделения CO_2 , PH_3 , P_2O_5 и т.п. Чем легче протекает процесс разложения соли, тем, как правило, выше ее огнетушащая эффективность.

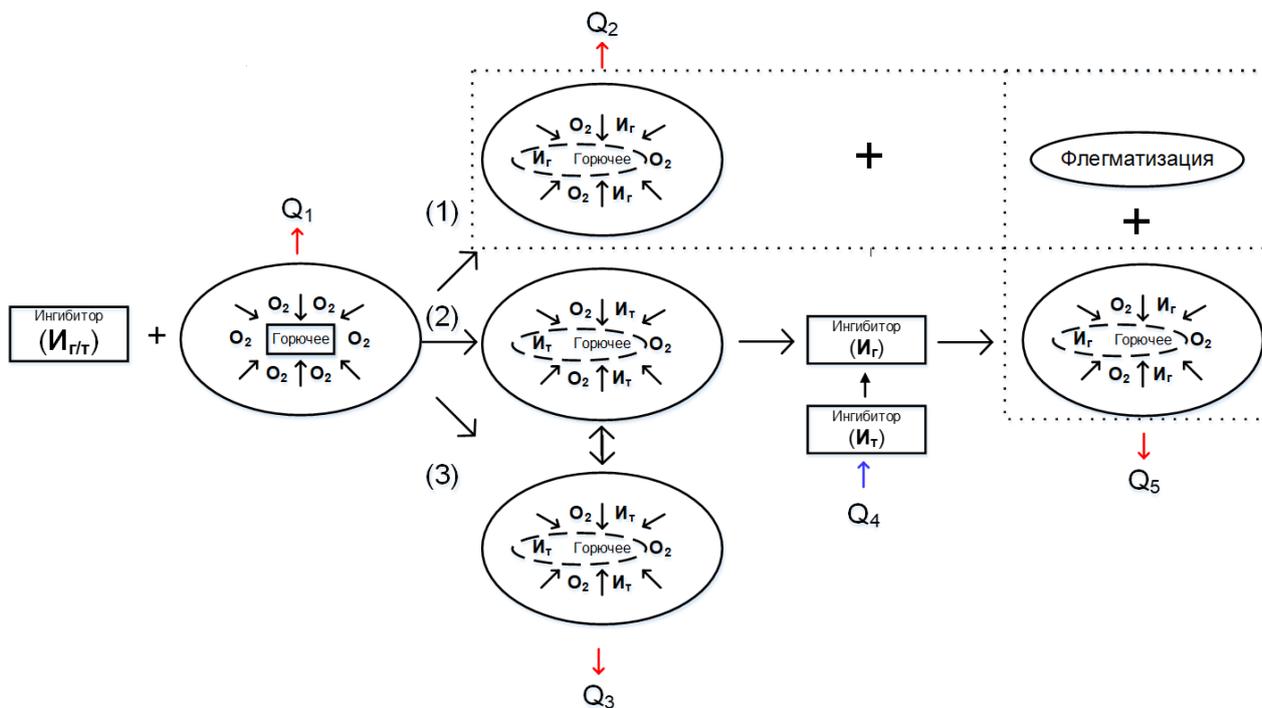
Химически активные добавки уже в концентрациях около 1 % могут оказывать существенное воздействие и сужать пределы воспламенения горючих паров и газов. Это наблюдалось, например, при добавлении к воздушным смесям углеводородов, водорода, окиси углерода, галоидсодержащих продуктов: CH_2ClBr , CH_3Br , а также CCl_4 и Cl_2 .

В качестве эффективных замедлителей горения также применяются азот-фосфорсодержащие соединения. Наблюдается устойчивая корреляция между содержанием P_2O_5 и огнетушащими свойствами огнетушащих порошковых составов. Содержание P_2O_5 (в пересчете) в различных огнетушащих порошковых составах колеблется от 12 до 49 % [17]. Перешедшие в газовую фазу молекулы огнетушащего порошка (в случае испарения) или их «осколки» (в случае разложения), вступая в прямые реакции с активными центрами пламени ($\dot{\text{N}}$, $\dot{\text{O}}$, OH , NH_3 и др.) или участвуя в них в качестве «третьей» частицы, могут замедлять процесс распространения горения в газовой смеси. Летучие соединения азота в газовой фазе вносят более существенный вклад в ингибирование радикальных процессов по сравнению с летучими соединениями фосфора [18]. Эффективность указанных ингибиторов горения определяется их количеством и скоростью поступления в газовую фазу.

Схема обобщенного энергетического механизма действия ингибиторов при гомогенном и гетерогенном ингибировании, описывающая взаимодействие активных центров пламени с ингибиторами, представлена на рисунке 4.

Представленная схема механизма действия ингибиторов показывает, что эффективность огнетушащих веществ зависит от количества элементарных актов взаимодействия ингибиторов с активными радикалами, количество которых напрямую связано с количеством горючего вещества. В процессе взаимодействия ингибитора с радикалами образуются малоактивные атомы и соединения, а радикалы исчезают. Механизм ингибирования по варианту 1 (рис. 4) приводит к дезактивации радикалов в гомогенной системе, по варианту 2 – к гибели радикалов в гетерогенной системе, которая сопровождается отводом тепла из зоны горения вследствие протекания эндотермических реакций с последующим ингибированием по варианту 1. Механизм ингибирования по варианту 3 приводит к дезактивации радикалов только за счет гетерогенной рекомбинации. С учетом представленной схемы обобщенного энергетического механизма действия ингибиторов приемы введения ингибирующих составов в зону горения главным образом должны обеспечивать их подачу в зону

образования активных центров. При этом можно предположить, что наиболее эффективным для тушения подавляющего большинства реальных пожаров, сопровождающихся пламенным турбулентным диффузионным горением, будет применение ингибирующих составов, способных оказывать комплексное гетерогенно-гомогенное ингибирование.



Q_1 – Q_3 , Q_5 – тепловые эффекты реакции; Q_4 – эндотермический тепловой эффект; O_2 – кислород; $I_{Т}$ – ингибитор в твердом агрегатном состоянии; $I_{Г}$ – ингибитор в газообразном агрегатном состоянии

Рисунок 4. – Схема (радикально-энергетическая) обобщенного энергетического механизма действия ингибиторов

Механизмы действия ингибирующих и флегматизирующих составов имеют сложную природу и оказывают непосредственное влияние на кинетику прерывания цепных процессов горения. В свою очередь, именно с прерыванием цепных реакций связано прекращение горения, а следовательно, и эффективность тушения пожаров. Рассмотренные обобщенные энергетические механизмы действия ингибирующих и флегматизирующих составов (рис. 3 и 4) имеют общую стадию (стадию флегматизации) несмотря на различные составляющие элементы. Поэтому ингибиторы называют активными флегматизаторами. Эффективность ингибиторов и флегматизаторов зависит от их свойств и количества, а также от времени и параметров введения в реакционную среду.

Заключение

Проведенный анализ механизмов действия флегматизаторов и ингибиторов позволяет предположить, что при их одновременном введении в зону горения важно учитывать возникающие фазовые переходы и особенности механизмов их действия. Эффективность флегматизации и ингибирования зависит как от природы и свойств ингибиторов и флегматизаторов, а так и от времени и параметров их введения в зону горения. При одновременной подаче указанных огнетушащих составов эффективность тушения может как снижаться, так и повышаться за счет синергического эффекта. Особенности механизмов действия ингибирующих и флегматизирующих огнетушащих составов при их одновременном введении также необходимо рассматривать в совокупности с изменяющимися тепловыми и возникающими конвективными потоками, включающими как продукты реакции горения, так и огнетушащие вещества. При этом наибольшая эффективность тушения будет достигаться при гетеро- и гомогенном действии и их введении непосредственно в нижнюю об-

ласть зоны горения. Таким образом, правильное сочетание огнетушащих составов гетерофазного действия с учетом их химических свойств и фазовых превращений является перспективным и представляет как научный, так и практический интерес. С учетом имеющегося уровня знаний актуальной остается выработка рекомендаций по составу огнетушащих средств, содержащих в определенном соотношении ингибирующие и флегматизирующие компоненты. Поэтому для получения ингибирующих и флегматизирующих составов с улучшенными свойствами необходимо проводить дополнительные исследования для определения их взаимного влияния на процесс тушения пламенного горения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Семенов, Н.Н. Цепные реакции / Н.Н. Семенов. – М.: Наука, 1986. – 535 с.
2. Франк-Каменецкий, Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д.А. Франк-Каменецкий. – М.: Наука, 1987. – 502 с.
3. Семенов, Н.Н. К теории процессов горения / Н.Н. Семенов // Избранные труды: в 4 т. – М.: Наука, 2005. – Т. 2. Горение и взрыв. – С. 155–163.
4. Волков, А.И. Большой химический справочник / А.И. Волков, И.М. Жарский. – Минск: Современная школа, 2005. – С. 68–80.
5. Химия нефти и газа: учебное пособие для студентов химико-технологических специальностей вузов / А.И. Богомолов [и др.]; ред.: В.А. Проскуряков, А.Е. Драбкин. – Ленинград: Химия, Ленингр. отд-ние, 1981. – 360 с.
6. Корольченко, А.Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Справочник: в 2 ч. / А.Я. Корольченко, Д.А. Корольченко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Ас. «Пожнаука», 2004. – Ч. I. – 713 с.
7. Корольченко, А.Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Справочник: в 2 ч. / А.Я. Корольченко, Д.А. Корольченко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Ас. «Пожнаука», 2004. – Ч. II. – 774 с.
8. Зельдович, Я.Б. Математическая теория горения и взрыва / Я.Б. Зельдович [и др.]. – М.: Наука, 1980. – 478 с.
9. Вулис, Л.А. Тепловой режим горения / Л.А. Вулис. – М.: Госэнергоиздат, 1954. – 289 с.
10. Блинов, В.И. Диффузионное горение жидкостей / В.И. Блинов, Г.Н. Худяков. – М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1961. – 208 с.
11. Frank-Kamenetskii, D.A. Calculation of thermal explosion limits / D.A. Frank-Kamenetskii // Acta Physicochimica U.R.S.S. – 1939. – No. 10. – P. 365–370.
12. Говоров, В.И. Теоретические основы горения и взрыва: курс лекций / В.И. Говоров, В.М. Плотников, Е.В. Каратай. – Темиртау: КГИУ, 2007. – 89 с.
13. Rosser, W.A. The effect of metal salts on premixed hydrocarbon–air flames / W.A. Rosser, S.H. Inami, H. Wise // Combustion and Flame. – 1963. – Vol. 7. – P. 107–119. – DOI: 10.1016/0010-2180(63)90168-8.
14. Burke, R. Kinetics of laminar premixed methane – oxygen – nitrogen flames / R. Burke, A. van Tiggelen // Bulletin des Sociétés Chimiques Belges. – 1965. – Vol. 74, No. 9–10. – P. 426–449. – DOI: 10.1002/bscb.19650740907.
15. Баратов, А.Н. и др. Горючесть веществ и химические средства пожаротушения: сб. статей / науч. ред. А.Н. Баратов; Всесоюз. науч.-исслед. ин-т противопожарной обороны. – М.: ВНИИПО. – 1974. – Вып. 2. – 140 с.
16. Цап, В.Н. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов в агропромышленном комплексе. Справочное издание / В.Н. Цап, С.Н. Байтова, Т.М. Гапеева. – Могилев, МГУП, 2007. – 59 с.
17. Сабинин, О.Ю. Оптимальные характеристики огнетушащих порошков и параметры их подачи для импульсных модулей порошкового пожаротушения: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / О.Ю. Сабинин. – Москва, 2008. – 176 л.
18. Богданова, В.В. Превращения сурьма-галоген- и азот-фосфорсодержащих антипиренов в полиолефинах и их огнегасящая эффективность / В.В. Богданова // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. – 2001. – Т. 43, № 4. – С. 746–750. – EDN: RHXWAL.

**Особенности механизмов действия ингибирующих
и флегматизирующих огнетушащих составов**

**Features of the mechanisms of action of inhibiting
and plegmatizing fire extinguishing compositions**

Журов Марк Михайлович

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра химической,
биологической, радиационной и ядерной
защиты, начальник кафедры

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: Zhurmark@mail.ru

ORCID: 0000-0001-5228-7371

Mark M. Zhurov

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Chemical, Biological,
Radiation and Nuclear Protection,
Head of the Chair

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: Zhurmark@mail.ru

ORCID: 0000-0001-5228-7371

FEATURES OF THE MECHANISMS OF ACTION OF INHIBITING AND PHLEGMATIZING FIRE EXTINGUISHING COMPOSITIONS

Zhurov M.M.

Purpose. To analyze the theoretical aspects of the mechanisms of action of inhibitory and phlegmatizing fire extinguishing compositions.

Methods. Analytical, comparative evaluation of the mechanisms of action of inhibitory and phlegmatizing compounds.

Findings. Comparative analysis of theoretical aspects of the mechanisms of action of inhibitory and phlegmatizing compounds. The energy relationship between the chemical reaction of combustion and the thermal theory of extinction is shown. The values of bond breaking energies for some combustible molecules and their radicals are generalized. The standard breaking energies of chemical bonds of halogen derivatives of saturated hydrocarbons and their fire-extinguishing efficiency are compared, which indicates the relationship of their nature with the fire-extinguishing effect.

Application field of research. Modern approaches to the development of fire-extinguishing compositions for the intended purpose. Development of innovative materials and technologies.

Keywords: inhibitory and phlegmatizing compositions, fire extinguishing, mechanisms of action, radicals, radical chain mechanism, chemical bond energy.

(The date of submitting: April 5, 2023)

REFERENCES

1. Semenov N.N. *Tsepnye reaktsii* [Chain reactions]. Moscow: Nauka, 1986. 535 p. (rus)
2. Frank-Kamenetskiy D.A. *Diffuziya i teploperedacha v khimicheskoy kinetike* [Diffusion and heat transfer in chemical kinetics]. Moscow: Nauka, 1987. 502 p. (rus). Url: http://elib.biblioatom.ru/text/frank-kamenetskiy_diffuziya-i-teploperedacha_1987/go,0/.
3. Semenov N.N. K teorii protsessov gorenija [To the theory of combustion processes]. Selected works: in 4 vols. Moscow: Nauka, 2005. Vol. 2. *Gorenie i vzryv* [Combustion and explosion]. P. 155–163. (rus). Url: http://elib.biblioatom.ru/text/semenov_izbrannye-trudy_t2_2005/go,156/.
4. Volkov A.I., Zharskiy I.M. *Bol'shoy khimicheskij spravochnik* [Big chemical reference book]. Minsk: Sovremennaya shkola, 2005. P. 68–80. (rus)
5. Bogomolov A.I., Gayle A.A., Gromova V.V., Drabkin A.E., Proskuryakov V.A., Rozental' D.A., Rudin M.G., Syroezhko A.M. *Khimiya nefi i gaza* [Chemistry of oil and gas]: tutorial for students of chemical and technological specialties of universities. Ed. by V.A. Proskuryakov, A.E. Drabkin. Leningrad: Khimiya, Leningrad branch, 1981. 360 p. (rus)
6. Korol'chenko A.Ya., Korol'chenko D.A. *Pozharovzryvoopasnost' veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya* [Fire and explosion hazard of substances and materials and means of extinguishing them]. Handbook: in 2 parts. Moscow: Pozhnauka, 2004. Part 1. 713 p. (rus)
7. Korol'chenko A.Ya., Korol'chenko D.A. *Pozharovzryvoopasnost' veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya* [Fire and explosion hazard of substances and materials and means of extinguishing them]. Handbook: in 2 parts. Moscow: Pozhnauka, 2004. Part 2. 774 p. (rus)
8. Zel'dovich Ya.B., Barenblatt G.I., Librovich V.B., Makhviladze G.M. *Matematicheskaya teoriya gorenija i vzryva* [Mathematical theory of combustion and explosion]. Moscow: Nauka, 1980. 478 p. (rus)
9. Vulis L.A. *Teplovoy rezhim gorenija* [Thermal regime of combustion]. Moscow: Gosenergoizdat, 1954. 289 p. (rus)
10. Blinov V.I., Khudyakov G.N. *Diffuzionnoe gorenie zhidkostey* [Diffusion combustion of liquids]. Moscow: Academy of Sciences of the USSR, 1961. 208 p. (rus)
11. Frank-Kamenetskiy D.A. Calculation of thermal explosion limits. *Acta Physicochimica U.R.S.S.* 1939. No. 10. Pp. 365–370.
12. Govorov V.I., Plotnikov V.M., Karatay E.V. *Teoreticheskie osnovy gorenija i vzryva* [Theoretical foundations of combustion and explosion]: course of lectures. Temirtau: Karaganda State Industrial University, 2007. 89 p. (rus)

13. Rosser W.A., Inami S.H., Wise H. The effect of metal salts on premixed hydrocarbon–air flames. *Combustion and Flame*, 1963. Vol. 7. Pp. 107–119. DOI: 10.1016/0010-2180(63)90168-8.
14. Burke R., van Tiggelen A. Kinetics of laminar premixed methane – oxygen – nitrogen flames. *Bulletin des Sociétés Chimiques Belges*, 1965. Vol. 74, Iss. 9–10. Pp. 426–449. DOI: 10.1002/bscb.19650740907.
15. Goryuchest' veshchestv i khimicheskie sredstva pozharotusheniya [Combustibility of substances and chemical fire extinguishing agents]: collection of articles. Ed. by A.N. Baratov; All-Union Research Institute for Fire Protection. Moscow: VNIPO, 1974. Iss. 2. 140 p. (rus)
16. Tsap V.N., Baitova S.N., Gapeeva T.M. Pozharovzryvoopasnost' veshchestv i materialov v agropromyshlennom komplekse [Fire and explosion hazard of substances and materials in the agro-industrial complex]. Reference book. Mogilev, Mogilev State University of Food, 2007. 59 p.
17. Sabinin O.Yu. *Optimal'nye kharakteristiki ognetushashchikh poroshkov i parametry ikh podachi dlya impul'snykh moduley poroshkovogo pozharotusheniya* [Optimal characteristics of fire-extinguishing powders and parameters of their supply for impulse modules of powder fire-extinguishing]: PhD tech. sci. diss.: 05.26.03. Moscow, 2008. 176 p. (rus)
18. Bogdanova V.V. Prevrashcheniya sur'ma-galogen- i azot-fosforsoderzhashchikh antipirenov v poliolefinakh i ikh ognegasyashchaya effektivnost' [Transformations of antimony-halogen- and nitrogen-phosphorus-based flame retardants in polyolefins and their performance]. *Polymer Science. Series B*. Vol. 43, No. 4. Pp. 746–750. (rus). EDN: RHXWAL.