



**Огнетушащие средства и
механизмы прекращения
горения ими**

Тема-8

1. Понятие огнетушащие средства и их классификация

- Из обширного понятия огнетушащих средств пожаротушения в круг вопросов дисциплины входят только огнетушащие составы, механизм их действия на процессы горения, их физико-химические свойства и качества, которые необходимо знать для применения их с максимальной эффективностью. Поэтому под огнетушащими средствами (ОС) будем понимать различные вещества и материалы, с помощью которых можно непосредственно создавать условия прекращения горения.

КЛАССИФИКАЦИЯ ОС

- **По агрегатному состоянию ОС** подразделяются на жидкие (вода и водные растворы и др.), пенные ОС (ВМ и химическая пены), порошковые составы (ПС), сыпучие материалы (песок, земля, флюсы, специальные составы и др.).
- **По механизму прекращения горения** огнетушащие средства подразделяются на четыре группы: охлаждающие зону реакции или горящие вещества; разбавляющие реагирующие вещества в зоне реакции горения; химически тормозящие реакцию горения; изолирующие реагирующие вещества от зоны горения.

- Охлаждение зоны реакции (снижение температуры в зоне реакции) происходит всегда, во всех случаях, т.е. при любом механизме прекращения горения. А охлаждение горючих веществ целесообразно только в тех случаях, когда снижение их температуры до определенного уровня может привести к прекращению процесса горения. Это зависит от агрегатного состояния горючего материала. Охлаждение газообразных горящих веществ лишено практического смысла, так как горючие газы горят при любой начальной температуре, а охлаждение ЛВЖ, ГЖ и твердых горючих материалов при их диффузионном (гомогенном) горении наиболее целесообразно. Но оно не имеет прямой связи с охлаждением зоны реакции, а влияет на нее лишь косвенно, через другие параметры процесса горения. Оно ведет к снижению интенсивности или полному прекращению выхода горючих паров ЛВЖ, ГЖ или продуктов пиролиза, при горении ТГМ, в зону реакции, т.е. к обеднению зоны реакции газообразным горючим компонентом, к разбавлению зоны реакции окислителем (окружающим воздухом), продуктами горения, а далее - к снижению интенсивности реакций горения и интенсивности тепловыделения. Это, в свою очередь, вызывает снижение температуры в зоне реакции, т.е. приводит к охлаждению зоны реакции. Охлаждение горючих материалов совпадает с понятием тушения охлаждением зоны химических реакций горения лишь в частном случае гетерогенного горения твердых горючих веществ и материалов. Например, компактную струю воды надо подавать не в пламя (там она практически бесполезна), а на поверхность горючего материала.

- Охлаждение факела пламени и горящего материала будет тем полнее, чем больше поверхность и время контакта охлаждающего вещества с газовой средой или с горючим материалом. Поэтому при возможности воду надо подавать в факел пламени или на горящую поверхность равномерно, т.е. более распыленной и непрерывно. Например, при тушении мощного газового или газонефтяного фонтана распыленные струи эффективнее, чем компактные. Но при этом необходимо учитывать следующее:
 - 1. Ручными приемами подать тонкораспыленную воду в факел пламени практически невозможно без специальных средств защиты ствольщиков от теплового излучения. Для этого применяют специальные технические устройства типа АГВТ или самоходной установки, обеспечивающей дистанционную подачу воды прямо к устью скважины.
 - 2. При подаче воды в зону горения степень дисперсности распыла капель и начальная скорость их полета должны быть максимальными, с тем чтобы они могли достигнуть факела пламени. В противном случае мощные конвективные потоки восходящего воздуха и горячие продукты горения (при подаче воды сверху) приведут к тому, что тонкораспыленная вода будет уноситься или испаряться, не достигая зоны горения.

- При выборе механизма прекращения горения важную роль играет исходное состояние горючего материала, вид и режим горения на пожаре. В зависимости от вида и режима горения, агрегатного состояния горючего вещества и других факторов механизм прекращения горения, реализуемый одним и тем же видом огнетушащего средства, может быть различен. Например, при тушении факела пламени газового фонтана и пожаров твердых горючих материалов с использованием порошковых огнетушащих средств. И, наоборот, один и тот же механизм прекращения горения может осуществляться различными видами огнетушащих средств. Например, механизм прекращения горения изоляций с применением пенных и порошковых огнетушащих средств при тушения пожаров, связанных с горением ЛВЖ, ГЖ с открытой поверхности или компактных твердых горючих материалов. Поэтому априорно и однозначно относить то или иное огнетушащее средство к определенной группе по механизму прекращения горения без учета конкретных условий применения ОС нельзя. В зависимости от условий их применения, основной механизм прекращения горения данным ОС может изменяться.

- И, наоборот, у различных огнетушащих средств механизм прекращения горения может быть одинаковым. Почти все огнетушащие средства, попадая в зону горения, действуют комплексно, одновременно по двум-трем и более механизмам прекращения горения. Они охлаждают горючий материал, кроме того, охлаждают зону реакции, разбавляют реагирующие компоненты в ней и т.д. Но для каждого огнетушащего средства существуют один-два основных механизма прекращения горения, которые являются доминирующими по сравнению с остальными, второстепенными, сопутствующими, побочными. Поэтому особенно важно наиболее четко выделить основной - доминирующий механизм. А уже по этому механизму прекращения горения относить то или иное огнетушащее средство к какой-либо группе, но при определенных условиях его применения.

- Наиболее широко применяются огнетушащие средства, охлаждающие поверхность горящих веществ и материалов и огнетушащие средства, изолирующие эти вещества и материалы от зоны горения. И то, и другое достигается методом подачи этих огнетушащих средств на поверхность горючего. В качестве огнетушащих средств в этом случае применяются жидкие, коллоидные, дисперсные системы и сыпучие твердые материалы. А в качестве объектов тушения выступают при в том преимущественно жидкие и твердые горючие материалы. Однако совокупный механизм прекращения горения более сложен. Наиболее простыми по механизму прекращения горения считаются нейтральные разбавители, применяемые преимущественно для тушения пламенного горения газов и паров горючих жидкостей. А наиболее однозначными по механизму прекращения горения считаются химически активные ингибиторы.

2. Механизм прекращения горения пламени нейтральными газами

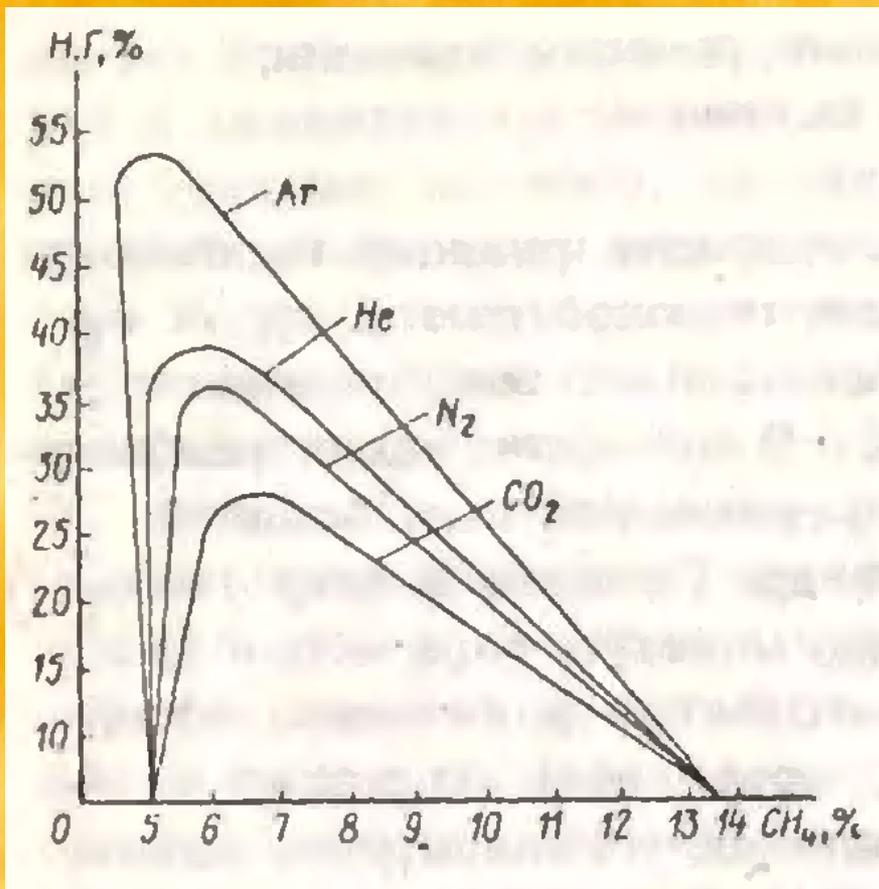
- Рассмотрим механизм снижения скорости реакций горения не изменением соотношения компонентов горючей смеси $[SEP]$ в зоне реакции, а введением разбавляющих эти реагенты нейтральных (инертных) газов (НГ). В качестве таких разбавителей чаще всего применяют азот, углекислый газ, водяной пар, реже гелий, аргон и некоторые др. Попадая в зону реакции, эти газы снижают концентрацию молекул горячего и окислителя в единице объема, и соответственно количество эффективных соударений их молекул. Это приводит к снижению скорости реакции, скорости тепловыделения, температуры, доводя ее в зоне реакции до T_{II} . Известно, что диффузионное горение прекращается при концентрации кислорода приблизительно около 14%. Но, если бы механизм прекращения горения всех нейтральных газов сводился к простому разбавлению, то количество НГ, необходимое для тушения диффузионного пламени, было бы одним и тем же, независимо от вида НГ.

- Из физики горения и из практики пожаротушения известно, что огнетушащие концентрации НГ зависят не только от вида разбавителя, но и от вида горючего и от условия их подачи и от многих других факторов.
- Рассмотрим их более подробно. Кроме рассмотренного выше механизма прекращения горения путем простого разбавления, нейтральные газы по-разному воздействуют на зону реакции горения в зависимости от их физических свойств.
- Поступая в зону реакции с температурой окружающей среды 20-30 С, они прогреваются до температуры приблизительно 1000 С, отнимая некоторое количество тепла.

- Количество отводимого тепла можно определить по формуле

$$Q_{\text{НГ}} = V_{\text{НГ}} \rho_{\text{НГ}} - c_{p_{\text{НГ}}} \Delta t_{\text{НГ}}$$

- где $V_{\text{НГ}}$ — объем подаваемого в зону горения нейтрального газа;
- $\rho_{\text{НГ}}$ — плотность нейтрального газа;
- $c_{p_{\text{НГ}}}$ - удельная теплоемкость нейтрального газа;
- $\Delta t_{\text{НГ}}$ - разность температур нейтрального газа и зоны горения.
- Поэтому чем выше теплоемкость вводимых в зону реакции нейтральных газов, тем эффективнее их огнетушащее действие.



Некоторые нейтральные газы, помимо снижения интенсивности тепловыделения и повышения теплоотвода из зоны реакции, увеличивают интенсивность теплоотвода за счет резкого повышения коэффициента теплопередачи газовой смеси

$$\lambda''_{\text{см}} \gg \lambda_{\text{см}}$$

По такому механизму прекращения горения действует, например, гелий ($\lambda_{\text{He}} = 6\lambda_{\text{N}_2}$). А так как при этом интенсифицируется и теплоотвод к свежей горючей смеси при кинетическом режиме горения, то от введения таких ИГ скорость распространения пламени должна повышаться. Но механизм прекращения горения нейтральных газов более сложный. Он зависит не от a , как фактора разбавления, не от $\lambda_{\text{ИГ}}$ или C_p смеси, а зависит и от степени разбавления, и от комплексного параметра C_p / λ

- Зависимость огнетушащей концентрации негорючего газа от концентрации горючего в смеси

- Причем повышение теплопроводности смеси газов после введения разбавителя не повышает эффективности НГ; а снижает ее. Это объясняется тем, что при введении НГ, более существенна интенсификация теплоотвода в свежую горючую смесь, где $T_{\text{см}} < T_{\text{ЗР}}$ (незначительное повышение теплоотвода в продукты горения, так как $T_{\text{ЗР}} = T_{\text{ПР.С}}$ оказывается несущественным).
- Количество тепла q , отводимого от зоны реакции, пропорционально коэффициенту λ и градиенту температур

$$\frac{dT}{dx}, \quad q = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

, а градиент температур в сторону горючей смеси в десятки и даже в сотни раз выше, чем в сторону продуктов горения.

- Интенсификация теплопередачи в свежую горючую смесь, поступающую в зону горения, ускоряет процесс горения. Поэтому коэффициент λ стоит в знаменателе дроби, определяющей огнегасящую эффективность нейтральных газов. Произведем количественный анализ эффективности нейтральных газов, начиная с простейшего - азота, которого в воздухе и без того около 80%. Его огнетушащая концентрация равна примерно 35-40%, при этом концентрация кислорода снижается до 14-15%, при которой происходит прекращения диффузионного горения (из-за низкой концентрации кислорода в смеси). Примерно такова же (чуть ниже) огнетушащая эффективность гелия. Но теплопроводность гелия в 6 раз выше теплопроводности азота. Зато и теплоемкость гелия в 5 раз выше теплоемкости азота. $\lambda_{\text{He}} = 6\lambda_{\text{N}_2}$, а $C_{p \text{ He}} = 5 C_{p \text{ N}_2}$. Поэтому

- $$\left(\frac{C_p}{\lambda} \right)_{\text{He}} = \left(\frac{C_p}{\lambda} \right)_{\text{N}_2} \quad \text{и, соответственно, } \alpha_{\text{He}} = \alpha_{\text{N}_2}.$$

- Анализ этих параметров для аргона и двуокиси углерода показывает, что теплопроводность этих разбавителей примерно одинакова:
- $\lambda_{CO_2} = 13,6 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, а $\lambda_{Ar} = 16,6 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.
- А теплоемкости их различаются почти в 2 раза:
- $C_{p, CO_2} = 0,91 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$, а $C_{p, Ar} = 0,53 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$.
- Соответственно, комплекс C_p / λ для двуокиси углерода будет равен:

- $$\left(\frac{C_p}{\lambda} \right)_{CO_2} = \frac{0,91}{13,6} = 6,7 * 10^{-2}$$

а для аргона

- $$\left(\frac{C_p}{\lambda} \right)_{Ar} = \frac{0,53}{16,6} = 3,2 * 10^{-2}$$

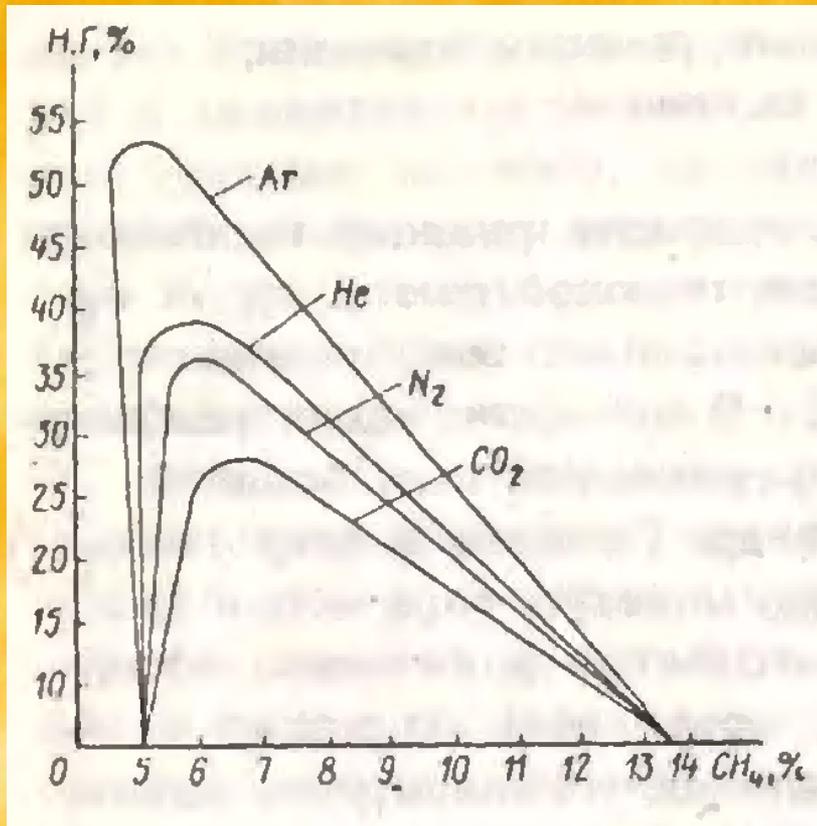
- Отношение этих комплексов будет равно

- $$\left(\frac{C_P}{\lambda}\right)_{CO_2} / \left(\frac{C_P}{\lambda}\right)_{Ar} = \frac{6.7 * 10^{-2}}{3.2 * 10^{-2}} = 2.1$$

- значит, огнетушащая эффективность CO_2 должна быть примерно в 2 раза выше огнетушащей эффективности аргона.
- Экспериментальные исследования по определению огнетушащих концентраций при горении метано-воздушных смесей (от 5% до 15% метана в воздухе) показали (см. рис. ниже), что для полного прекращения реакций горения аргона нужно довести до $\sim 53\%$ по объему, а двуокиси углерода $\sim 27\%$ по объему, т.е. $\alpha_{Ar} = 2 \alpha_{CO_2}$, точнее, $53/27 = 1,97$.

- Огнетушущая концентрация аргона почти в 2 раза выше, чем CO_2 ; т.е. обратно пропорциональна отношению

комплексов $\left(\frac{C_P}{\lambda}\right)$. Отсюда следует что огнетушащие составы действуют и по механизму прекращения горения разбавлением и снижением скорости тепловыделения, и по механизму прекращения горения теплоотводом на нагревание вводимых НГ, и по механизму интенсификации теплоотода из зоны реакции и т.д.



- Отсюда следует что огнетушащие составы действуют и по механизму прекращения горения разбавлением и снижением скорости тепловыделения, и по механизму прекращения горения теплоотводом на нагревание вводимых НГ, и по механизму интенсификации теплоотвода из зоны реакции и т.д.
- Огнетушащие концентрации одних и тех же нейтральных газов (приводящие к полному прекращению процесса горения) неодинаковы для различных горючих веществ и материалов. Так, например, для тушения пламени бензина концентрация углекислого газа составляет 19-20%, а для тушения древесины 25%.
- Механизм прекращения горения водяного пара таков же, как и рассмотренные выше, а огнетушащая концентрация его близка к концентрации азота и равна 30-35% по объему.

3. Механизм прекращения горения пламени химическими активными ингибиторами

- Наиболее 'чистым' или 'прямым' однофакторным способом прекращения процессов горения обычно считается механизм тушения пламени химически активными ингибиторами (ХАИ). Механизм прекращения горения химически активными ингибиторами является наиболее сложным и на сегодня еще недостаточно полно изучен. Он заключается в снижении скорости химической реакции ими или в химическом торможении скорости реакции (снижение скорости тепловыделения в зоне реакции, расширение зоны реакции и т.д.). Сам механизм химического торможения скорости реакций в зоне горения может быть представлен следующим образом.

- Из физики горения известно, что при протекании химических реакций в процессе превращения исходных компонентов горючей смеси в конечные продукты горения образуется и много промежуточных продуктов (сначала образуются промежуточные продукты разложения горючего, затем продукты неполного окисления, потом в процессе дальнейших взаимодействий этих промежуточных продуктов между собой и с исходными компонентами смеси или окислителем образуются конечные продукты реакции). Причем продолжение каждой последующей стадии химических реакций возможно при взаимодействии не любых промежуточных продуктов реакции, а лишь определенных химически активных комплексов (энергетически и химически возбужденных атомов и радикалов $H \cdot$, $CH \cdot$, $OH \cdot$, $CH_2 \cdot$ и др.).

- Эти химически активные комплексы в химической кинетике называются активными центрами реакции. Вступая во взаимодействие с другими промежуточными продуктами химических реакций, они продолжают последовательную цепь реакции, а если образуются новые активные центры, то происходит разветвление химических цепей, т.е. идет разветвленная (наиболее быстрая) цепная химическая реакция. Если в зону протекания химических реакций ввести дополнительные вещества, приводящие к нейтрализации активных центров, то будет происходить обрыв цепей. Причем чем интенсивнее нейтрализация активных центров реакции, тем эффективнее тормозящее воздействие химически активных ингибиторов на скорость промежуточных химических реакций, составляющих цепь последовательных реакций в процессе горения.

- Наиболее эффективно тормозящими промежуточные химические реакции горения являются галоидсодержащие или галоидированные углеводороды. Гибель активных центров химических реакций горения происходит тогда, когда они вступают во взаимодействие с атомами и радикалами, содержащими галоид, и образуют насыщенные малоактивные химические соединения:
- $H' + Br_2 = HBr + Br'$; $H' + Br' = HBr$.

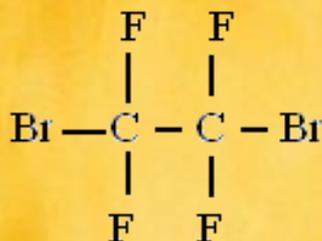
- Выведенные из зоны реакции активные атомы водорода вместо конечного продукта полного окисления H_2O дают насыщенное соединение HBr , которое, в свою очередь, является активным ингибирующим комплексом. Таким образом, выведены из зоны реакции два активных атома водорода, т.е. оборваны две цепочки реакций и возникли еще две молекулы ингибитора HBr . Это ведет к замедлению скорости реакции. В формуле резко снижается константа скорости реакции k (на несколько порядков) и увеличивается энергия активации E :

$$w = K C_A^n C_B^m e^{-\frac{E}{RT}}$$

- Концентрации компонентов практически не изменяются. Теплофизические параметры смеси, такие как теплоемкость, теплопроводность газовой смеси в зоне реакции, также изменяются относительно слабо (например, по сравнению с их изменением при введении в горючую смесь нейтральных разбавителей). Это объясняется тем, что количество химически активных ингибиторов, которое надо ввести в зону реакции для прекращения процессов горения, ничтожно мало и составляет 2-3%. Это почти в 10 раз меньше, чем требуется для тушения пламени наиболее эффективного из нейтральных газов CO_2 (25-30%), и примерно в 20-25 раз меньше, чем количество такого малоэффективного инертного разбавителя, как аргон, которого требуется около 50% для полного прекращения реакций горения.

- К химически активным ингибиторам относятся такие галоидированные углеводородные соединения, как четырёххлористый углерод CCl_4 , бромэтил C_2H_5Br , бромистый метилен CH_2Br_2 , тетрафтордибромэтан $C_2F_4Br_2$ и некоторые др.
- Расщепляясь в зоне реакции на свободные галоидрадикалы и углеродный или углеводородный остаток, эти химически активные ингибиторы вступают во взаимодействие с промежуточными продуктами реакции горения, приводя к обрыву цепных реакций горения.
- Например, CH_2Br_2 , разлагаясь, дает атом брома и углеводородный остаток C_2H_5 , который, разлагаясь, окисляется в зоне реакции до CO_2 и H_2O . Поэтому это огнетушащее вещество более эффективно при тушении богатых смесей (оно дает дополнительный горючий остаток, отнимающий кислород из зоны реакции, который в богатых смесях и так находится в дефиците). Он имеет и недостаток, при тушении бедных смесей и при концентрациях ингибитора 6-11% бромэтил сам является горючим веществом.

- Наиболее широкое применение в системах пожаротушения нашел фреон 114В2. Его структурная формула:



- При распаде молекулы в зоне высоких температур отщепляются два атома брома и дают два активно ингибирующих атома галоида, а соединение C_2F_4 - достаточно насыщено и действует в зоне реакции просто как "инертная масса". Возможны и другие схемы реакции. Все другие механизмы действия ХАИ менее существенны и в первом приближении могут быть не приняты во внимание.

- Хотя изменение теплофизических свойств горючей смеси при введении 'тяжелых молекул' химически активных ингибиторов также весьма существенно и вполне соизмеримо по огнетушащему эффекту с их 'тормозящим' влиянием. Действительно, даже 2-3% такого теплоемкого компонента, как тетрафтордибромэтан, молекулярная масса которого равна 260, теплоемкость паров $C_p=0,38$ кДж/моль, а энергия распада молекулы, начинающегося при 450-500°C, составляет $E_{рас}=273$ кДж/моль, могут существенно изменить теплофизические параметры горючей смеси.

Область применения нейтральных газов и химически активных ингибиторов.

- Галоидуглеводороды, применяемые для тушения пожаров, являются главным образом бромфторхлорпроизводными метана и этана. Они имеют промышленное название фреоны, хладоны и торговое - галлоны. Существует несколько систем их условного обозначения. По одной из них единицы (последняя цифра) означают число атомов фтора в молекуле, десятки (предшествующая ей цифра) - число атомов водорода, увеличенное на единицу, сотни (третья от конца цифра) - число атомов углерода, уменьшенное на единицу. Для обозначения бром- фреонов после номера фреона ставится буква «В» (обозначающая бром), а цифра после нее указывает на число атомов брома в фреоне. Число атомов хлора, если они имеются в молекуле фреона, по этой системе не указываются, а рассчитываются как недостающие по формуле $C_n(HClF)_{2n+2}$.

- Например, трифторхлорбромэтан $\underline{\text{C}_2}\underline{\text{HF}_3}\underline{\text{BrCl}}$ обозначается как фреон 123В1, где
- цифра 3 равна числу атомов фтора,
- 2 - числу атомов водорода плюс 1,
- 1 - числу атомов углерода минус 1,
- В1 — означает содержание атомов брома.
- Так как сумма атомов водорода, хлора, фтора и брома должна быть равна 6, то в молекуле фреона 123В1, должен содержаться один атом хлора.
- В соответствии с указанной выше системой дибромтетрафторэтан ($\underline{\text{C}_2}\underline{\text{F}_4}\underline{\text{Br}}$) будет маркироваться как фреон 114В2, бромтрифторметан ($\underline{\text{CF}_3}\underline{\text{Br}}$) - как фреон 13В1, а CF_2BrCl - фреон 12ВД.

- Из механизмов огнетушащего действия НГ и ХАИ следует, что наиболее эффективно их воздействие на саму зону химических реакций горения. Поэтому применять их следует преимущественно для прекращения пламенного горения. Поскольку действуют НГ и ХАИ в газообразном состоянии, а газы стремятся равномерно распределиться по всему окружающему пространству, то эти огнетушащие составы применяют преимущественно для тушения пожаров в замкнутых объемах: в зданиях, помещениях, сооружениях и т.п. Поэтому они применяются в основном в стационарных установках для тушения внутренних пожаров. Химически активными ингибиторами заполняют весь объем помещения, где произошел пожар, доводя концентрацию НГ до равной или выше огнетушащей. При этом необходимо учитывать утечки газа через неплотности с отходящими продуктами горения и т.д., а также неравномерность распределения НГ по защищаемому объему и другие факторы. Иногда НГ и особенно перегретый водяной пар применяют и для тушения пламен открытых пожаров на ректификационных колоннах, технологических установках и других промышленных объектах, где имеются запасы НГ или перегретого пара.

- Некоторые из галоидированных углеводородов обладают высокой токсичностью (особенно продукты термического распада их), и поэтому их не применяют для тушения пожаров.
- Зарубежными специалистами предложен параметр R , характеризующий токсичность ХАИ, представляющий собой отношение огнетушащей концентрации (ОГК) к опасной концентрации (ОК).
- Не применяют для целей пожаротушения ХАИ, у которых R больше 4, в также не следует использовать ХАИ с R больше 1 для помещений, где возможно присутствие людей.
- Из табл. ниже видно, что наименее опасным является галон 1301. Галон 1301 в последние годы находит все более широкое применение за рубежом в системах пожаротушения судов и других помещений, где возможно пребывание людей.
- Химически активные ингибиторы также применяются в ручных огнетушителях, устанавливаемых на различных видах транспорта: автомобилях, поездах, самолетах и судах.
- Галоидуглеводороды в отсутствие воды не взаимодействуют с большинством металлов, однако при наличии влаги они вызывают сильную коррозию.

Сравнительные характеристики некоторых ХАИ по их огнетушащей эффективности и токсичности.

Агент	Опасная концентрация		Огнетушащая концентрация		R= ОГК/ОК
	%, об.	кгм ³	%, об.	кгм ³	
Г 104	1,2	0,082	9,7	0,662	8,1
Г 1001	0,6	0,026	7,1	0,304	11,8
Г 1011	2,6	0,147	6,35	0,352	2,4
Г 1211	24,0	1,762	5,2	0,384	0,22
Г 1301	50	2,403	4,9	0,326	0,098
Г 2402	8,5	0,992	3,5	0,406	0,41
CO ₂	50	0,625	42	0,525	0,84

4. Пены как огнетушащие средства

- Пена представляет собой дисперсную двухфазную систему, состоящую из ячеек, заполненных газом или паром и разделенных плёнками жидкости. Газ или пар, заполняющий ячейки, является дисперсной фазой, а жидкость - дисперсионной средой.
- По способу получения пены бывают химические и воздушно-механические.

СВОЙСТВА ПЕНЫ

- 1. Структура пены. Структура пены определяется отношением объемов газовой и жидкой фаз в единице объема пены и характеризует механические и реологические ее свойства. Если объем газовой фазы превышает объем жидкости не более чем в 10-20 раз, ячейки пены, заполненные газом, имеют сферическую форму. В таких пенах газовые пузырьки окружены оболочками жидкости относительно большой толщины. С увеличением отношения $V_{\text{г}}/V_{\text{ж}}$ толщина пленки жидкости, разделяющая газовые объёмы, уменьшается, а газовая полость утрачивает сферическую форму и трансформируется в многогранник. Пены, у которых отношение $V_{\text{г}}/V_{\text{ж}}$ составляет несколько десятков или даже сотен, имеют полиэдрическую (многогранную) форму, причём форма многогранников может быть различной - параллелепипеды, треугольные призмы, тетраэдры и т.д. Со временем происходит утончение жидких оболочек и, как следствие, изменение структуры пены - старение. В процессе старения шарообразная форма ячеек переходит в многогранную.

2. Кратность пены.

- Кратность пены K_{Π} - это отношение объёма пены V_{Π} к объёму жидкости $V_{ж}$, из которой она получена:

$$K_{\Pi} = \frac{V_{\Pi}}{V_{ж}} = \frac{V_{г} + V_{ж}}{V_{ж}}$$

- где $V_{г}$ - объем газа.
- Различают пены низкой кратности - $K_{\Pi} < 20$, средней кратности - $20 < K_{\Pi} < 200$ и высокой кратности $K_{\Pi} > 200$.
- Отношение объёма газа в пене $V_{г}$ к объёму пены V_{Π} называется газосодержанием пены β :

$$\beta = \frac{V_{г}}{V_{\Pi}}$$

- Газосодержание и кратность связаны между собой соотношением

$$\beta = \frac{K_{\Pi} - 1}{K_{\Pi}} = 1 - \frac{1}{K_{\Pi}}$$

3. Дисперсность пены.

- Дисперсность пены D_{Π} оценивается либо средним размером пузырька, либо распределением пузырьков пены по размерам. Чаще всего под дисперсностью понимают величину, обратную среднему размеру пузырьков пены, т.е.

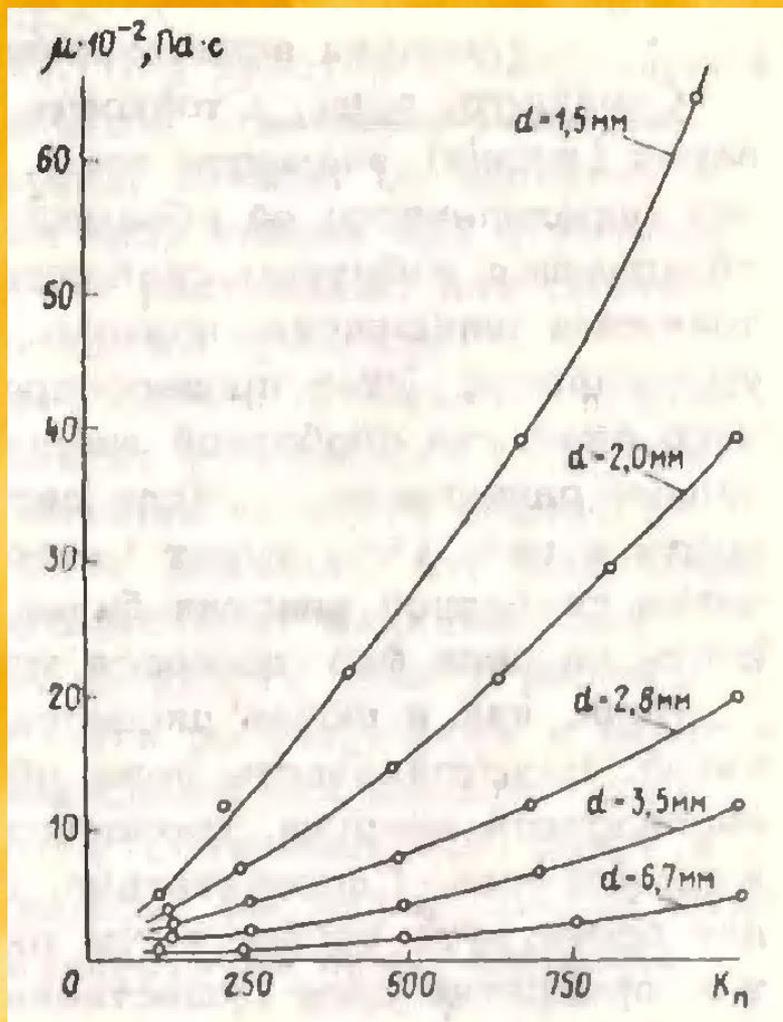
$$d_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} d_i N_i}{\sum N_i}$$

- где d_i - диаметр пузырьков фракции;
- $\sum N_i$ - общее число пузырьков всех фракций;
- N_i - число пузырьков фракции i с диаметром d_i .
- Чем меньше средний диаметр пузырька пены, тем больше ее дисперсность.

- Дисперсность пены характеризуется удельной поверхностью раздела фаз. Если пузырьки имеют одинаковые размеры, пена называется монодисперсной и соответственно если имеется i фракций или размеров пузырьков - полидисперсной. Пены могут быть высоко дисперсными или низкодисперсными.
- На дисперсность пены существенное влияние оказывают физико-химические свойства пенообразующего раствора (поверхностное натяжение, вязкость и т.д.), способ смешения фаз, конструкция генератора пены.
- Изучение влияния кратности пены на средний диаметр пузырьков показало, что с увеличением кратности пены растет и средний диаметр пузырьков. Так как при увеличении кратности пены толщина пленок между пузырьками уменьшается, соответственно растет средний диаметр пузырьков.
- Дисперсный состав пены изменяется во времени в процессе старения. Наиболее интенсивные изменения в дисперсном составе пены протекают в начальный момент после ее образования. Это происходит за счет изменения поверхности раздела фаз в пене в результате разрушения пленок между ячейками и их объединения. Отмечено, что с течением времени полидисперсность пены увеличивается.

4. Вязкость пены.

- Вязкость характеризует реологические свойства пены, т.е. ее способность к растеканию, и оценивается либо коэффициентом динамической вязкости - μ , либо напряжением сдвига - σ .
- В отличие от жидкости пена обладает свойствами "твёрдого тела". Внешне это проявляется в способности пены сохранять определенное время свою первоначальную форму.
- Вязкость пены зависит от многих факторов и параметров, прежде всего от природы пенообразователя, кратности, дисперсности. Зависимость коэффициента динамической вязкости μ пены от ее кратности при различных диаметрах пузырьков показана на рис. Из рисунка видно, что коэффициент динамической вязкости пены повышается с увеличением ее кратности и дисперсности.



- Со временем в процессе старения пены вязкость ее сначала увеличивается, а затем в зависимости от типа пенообразователя может оставаться постоянной или уменьшаться.
- Высокой вязкостью обладают пены, имеющие меньшую скорость истечения жидкости.
- Плотность пены зависит от соотношения жидкой и газовой фаз и может колебаться от $0,5 \rho_1$ (ρ_1 - плотность жидкой фазы) до значений, близких к $\rho_{\text{газа}}$. Пены, применяемые для тушения пожаров, имеют плотность $10-5 \text{ кг/м}^3$ и меньше. Плотность пены является величиной переменной во времени и зависит от степени разрушения пены.

Зависимость коэффициента

- **5. Теплопроводность пены.** Передача тепла в пене происходит через пузырьки газа и через жидкие пленки между этими пузырьками. Из-за наличия газовой фазы теплопроводность пены довольно мала.
- **6. Электропроводность пен.** Электропроводность пен пропорциональна количеству содержащейся в ней жидкости. Экспериментально установлено, что отношение электропроводности жидкости и электропроводности пены линейно связано с отношением их плотностей. Уравнение, описывающее эту зависимость, имеет вид;

$$\frac{x_0}{x_{\Pi}} = \frac{3}{2} K_{\Pi}$$

- где x_0 - удельная электропроводность раствора;
- x_{Π} - удельная электропроводность пены.

7. Стойкость пены.

- Стойкость пены - это время существования (жизни) элемента пены (отдельного пузырька, пленки) или определенного её объема. Известно, что замкнутая система, обладающая избытком свободной энергии, находится в неустойчивом равновесии, поэтому энергия такой системы всегда уменьшается. Этот процесс протекает до достижения минимального значения свободной энергии, при котором в системе наступает равновесие. Если система состоит, например, из жидкости и газа (что имеет место в пенах), то минимальное значение свободной энергии будет достигнуто тогда, когда поверхность раздела фаз окажется минимальной.
- Пена, как и любая дисперсная система, является неустойчивой. Неустойчивость пены объясняется наличием избытка поверхностной энергии, пропорциональной поверхности раздела фаз жидкость-газ. Следовательно, состояние равновесия пены будет достигнуто тогда, когда она превратится в жидкость и газ, т.е. прекратит свое существование. Поэтому применительно к пенам можно говорить лишь об относительной стойкости.

- По времени 'жизни' пены разделяются на короткоживущие (флотационные), долгоживущие (моющие, пожарные), безграничноживущие (отвержденные пены - вулканизованные, застеклованные).
- Разрушение пены в нормальных условиях происходит в результате истечения жидкости и разрыва пленок внутри пены. Преобладание того или другого из этих процессов при разрушении пены зависит от многих факторов. В стойких пенах пленки не разрушаются в течение 10-20 мин. В пенах высокой кратности ('сухих') процесс истечения затруднен и разрушение обусловлено в основном разрывом пленок.
- У пены средней кратности, т.е. пены с относительно толстыми прослойками между пузырьками оба механизма разрушения осуществляются последовательно: процесс начинается с истечения жидкости, заключенной между пузырьками (синерезис). Это приводит к быстрому утончению пленок, и, как следствие, к разрыву.

- Истечение жидкости из пены представляет собой чисто гидродинамическое явление. Из всего объема пены раствор, содержащийся в прослойках, стекает вниз, подпитывая нижележащие спои пены. Истечение заканчивается, когда вся излишняя жидкость будет удалена. На этой стадии существенным становится влияние капиллярных явлений. Под действием капиллярных сил, обусловленных различной кривизной отдельных участков пленки пузырька, что, в свою очередь, зависит от давления в соседних пузырьках, поверхностные спои пленок при истечении подвергаются упругим деформациям - растяжению или сжатию, что также приводит к разрушению пленки пузырька.

- Скорость истечения жидкости из оболочки пузырьков, а, следовательно, и стойкость пены зависят от вязкости пенообразующего раствора. Исследование влияния вязкости пенообразующего раствора на стойкость пены показали, что максимальная стойкость пены не всегда соответствует максимальной вязкости раствора. Для повышения стойкости пены в раствор вводят стабилизаторы. Они могут быть растворимыми и нерастворимыми. Эффективными стабилизаторами пен являются карбоксиметилцеллюлоза, полиакриламид, поливиниловый спирт и др. Эти вещества, увеличивая вязкость раствора, способствуют замедлению процесса истечения жидкости из пены.

- Скорость разрушения пены определяется отношением –

$$\frac{\Delta V_{\Pi}^{РАЗР}}{\Delta r}$$

- Δr , а степень разрушения – $\frac{\Delta V_{\Pi}^{РАЗР}}{V_{\Pi}}$

- где $\Delta V_{\Pi}^{РАЗР}$ - объем пены, разрушившейся за промежуток времени,

- V_{Π} - начальный объем пены.

- Интенсивность разрушения пены определим по формуле

$$I_{РАЗР} = \frac{\Delta V_{\Pi}^{РАЗР}}{V_{\Pi}} * \frac{1}{\Delta r}$$

- Чаще пользуются понятием стойкость пены или устойчивость. Стойкость пены S_{Π} - это величина, обратная интенсивности разрушения:

$$S_{\Pi} = \frac{1}{I_{РАЗР}}$$

- Интенсивность разрушения пены характеризуется скоростью уменьшения ее объема –
$$\frac{\Delta V_{\Pi}^{PA3P}}{\Delta r}$$
- Косвенным показателем этого процесса может служить скорость выделения из пены жидкой фазы (отсека). Под стойкостью пены понимается время, в течение которого из пены выделяется 50% объема жидкости, из которой она получена. Эта величина является условной, так как при тушении пожара пена разрушается не только за счет тех факторов, которые рассматривались ранее (синерезис жидкой фазы и разрушение стенок пузырьков в результате их утончения или под действием капиллярных сил), но также и под действием таких факторов, как смятие пены (силы трения при движении); термическое воздействие окружающей среды (контакте горячей жидкостью или поверхностью, лучистый тепловой поток от пламени) и конвективные токи.

- В последнее время стали пользоваться понятием огнестойкости пены. Этот параметр в большей степени отвечает реальным условиям. Он определяется следующим образом. В противень наливается горючая жидкость. Затем на поверхность ГЖ подается слой пены определенной толщины таким образом, чтобы в углу противня остался небольшой участок открытой поверхности горючей жидкости. На этом участке жидкость поджигают и фиксируют время, в течение которого пламя распространится на всю поверхность жидкости.
- Экспериментально установлено, что стойкость пены зависит в основном от температуры окружающей среды, дисперсности и толщины стенки пузырьков, т.е.

$$S = f \left(\frac{1}{t_{окр}}; d_{п}; \delta_{ст} \right)$$

- Толщина стенок пузырька - $\delta_{СТ}$, его диаметр - $d_{П}$ и кратность пены - $K_{П}$ связаны зависимостью:

$$\delta_{СТ} = \frac{d_{П}}{K_{П}}$$

- Если $d_{П} = \text{const}$ (монодисперсная пена), то $\delta_{СТ} \sim f(1/K_{П})$ и следовательно,

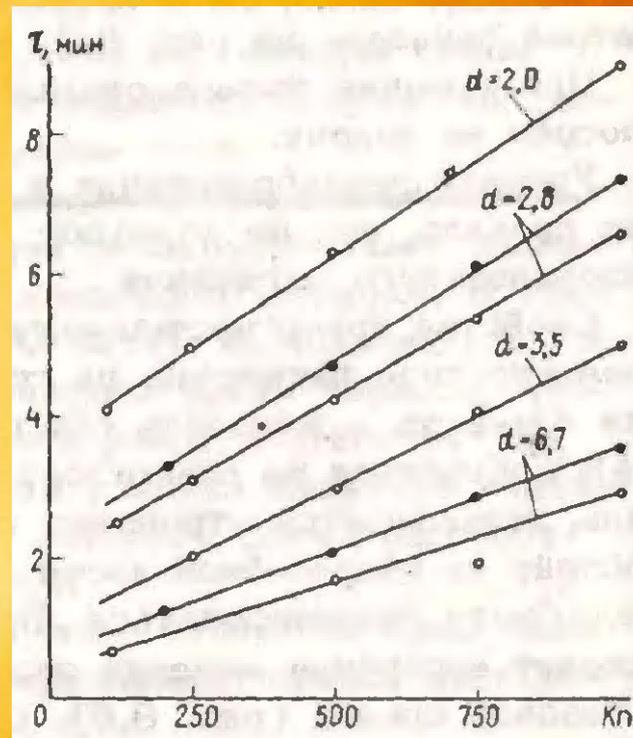
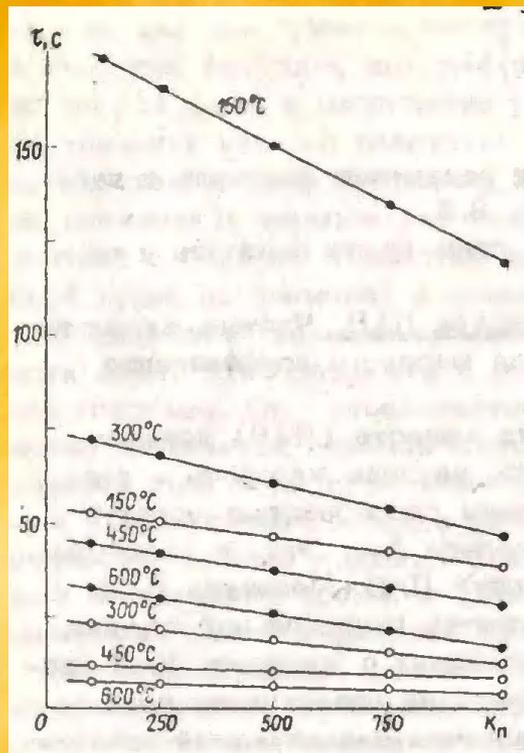
$$S_{П} = f\left(\frac{1}{t_{окр}}; d_{П}; \frac{1}{K_{П}}\right)$$

- Стойкость пены зависит также от высоты пенного слоя. При увеличении высоты слоя пены $H_{сл}$. уменьшается скорость выделения жидкой фазы, следовательно, стойкость пены увеличивается. Таким образом, для общего случая можно записать:

$$S_{П} = f\left(\frac{1}{t_{окр}}; d_{П}; \frac{1}{K_{П}}; H_{сл}\right)$$

При тушении пожара стойкость пены будет зависеть и от способа ее подачи.

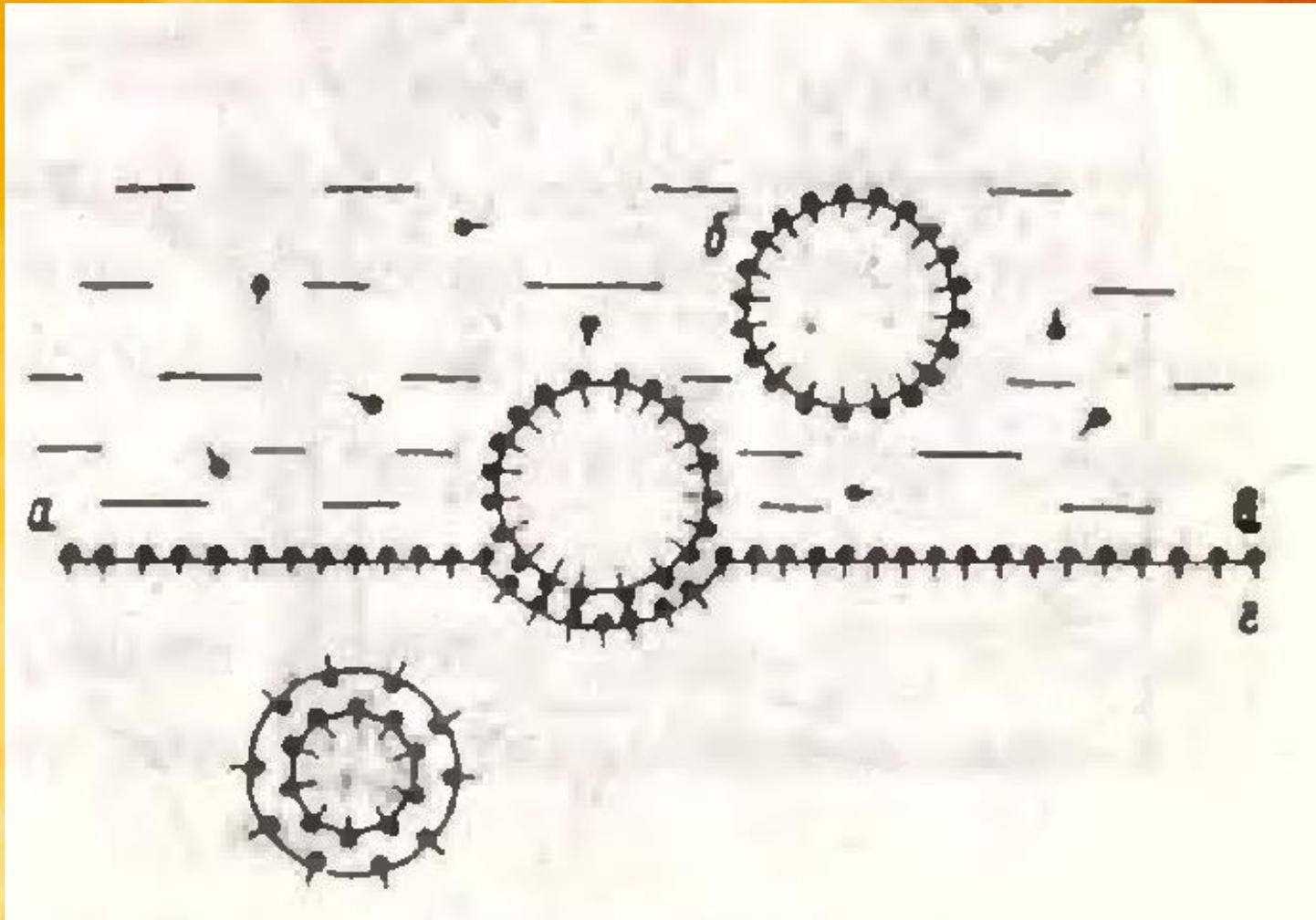
Зависимость стойкости пены от различных факторов и параметров



- Зависимость стойкости пены от ее кратности и температуры окружающей среды при $d_{п} = 6,7$ мм и $d_{п} = 1,5$ мм
- Время выделения 50% жидкой фазы из пены в зависимости от ее кратности и дисперсности при $V_{п} = \text{const}$

8. Условия пенообразования и свойства ПАВ.

- Чистые жидкости, как правило, пен не образуют из-за высокого коэффициента поверхностного натяжения.
- Свойства поверхностно-активных веществ (ПАВ) понижать поверхностное натяжение на границе раздела жидкость – газ или жидкость - жидкость обусловлены способностью молекул ПАВ собираться на поверхности раздела фаз. Это, в свою очередь, определяется строением молекул ПАВ. Молекула ПАВ состоит из гидрофобной части и остатка гидрофильной группы, способного гидратироваться. При введении в жидкость ПАВ происходит адсорбция молекул последнего на поверхности раздела с газовой средой (рис.). Образуется своеобразный поверхностный слой, в котором молекулы ПАВ ориентированы так, что гидрофильная часть молекулы находится в водной фазе, а гидрофобная направлена в сторону дисперсионной фазы (газовой среды).



- Схема образования пузырька пены: а - адсорбционный слой; б - пузырек пены; в - гидрофобная часть молекулы ПАВ; t - гидрофильная часть молекулы ПАВ

Классификация ПАВ основана на особенностях строения их молекул.

- 1. вещества, которые, растворяясь в воде, диссоциируют на ионы, и поэтому называются ионогенными. Их бывает две разновидности - анионоактивные и катионоактивные.
- Поверхностная активность анионоактивных ПАВ в растворах обусловлена анионами. К ним относятся щелочные соли жирных кислот, алкилсульфаты, алкилсульфонаты щелочных металлов и др. Поверхностная активность катионоактивных ПАВ определяется катионами. Этот класс соединений включает соли аминов, четвертичные аммониевые соли, алкилпиридионовые соли и др.

- 2. вещества, которые растворяются в воде, но не подвергаются диссоциации и не образуют ионов $-\overset{+}{S}EP-$ Они называются **неионогенными**. Растворимость неионогенных ПАВ зависит от сродства к воде функциональных групп, а поверхностная активность обусловлена дифильным строением молекул. К таким веществам относятся оксиэтилированные жирные спирты и кислоты, оксиэтилированные фенолы, а также оксиэтилированные амины, амиды и др.
- Существуют ПАВ, которые в зависимости от pH раствора могут проявлять **анионоактивные** (в щелочной среде) или **катионоактивные** свойства (в кислой среде). Они называются **амфотерными** или амфолитными. Подобными свойствами обладают алкиламинокислоты и другие вещества. Поверхностно-активные вещества оцениваются по пенообразующей способности их раствора.

- **9. Пенообразующая способность раствора** - это количество пены, которое образуется из объема раствора в течение определенного времени. По способности образовывать устойчивые пены пенообразователи разделяются на два рода:
- а) пенообразователи первого рода. Это вещества (низшие спирты, кислоты, анилин, крезолы), молекулы которых в объеме раствора находятся в молекулярно-дисперсном состоянии. Пены из таких пенообразователей быстро распадаются по мере истечения между пленочной жидкости. Стойкость пен увеличивается с повышением концентрации пенообразователя, достигая максимального значения, а затем падает почти до нуля;
- б) пенообразователи второго рода (мыла, синтетические ПАВ) образуют в воде коллоидные системы, пены из них обладают высокой стойкостью. Истечение между пленочной жидкости в таких пенах в определенный момент прекращается, а пенный 'каркас' может сохраняться длительное время при отсутствии разрушающих внешних факторов (вибрация, поток воздуха, тепловой поток и др.).

Механизм прекращения горения пеной с момента ее подачи на горящую поверхность и до образования сплошного слоя пены представляет собой комплекс явлений.

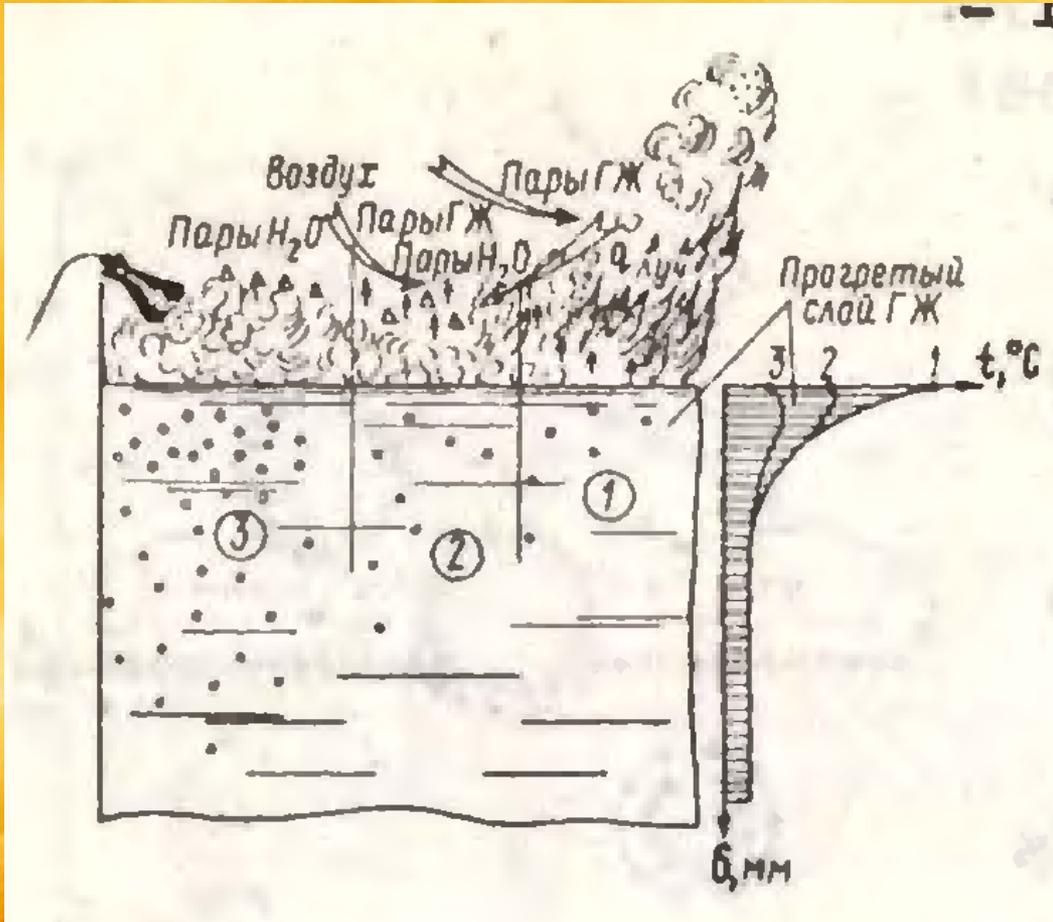


Схема прекращения горения жидкости воздушно-механической пеной:

- 1 - участок свободного горения;
- 2 - участок активного воздействия пены на процесс горения;
- 3 - участок, на котором горение прекращено.

Основные моменты:

- 1. Образование локального слоя пены на поверхности горючей жидкости при её тушении зависит от соотношения скоростей двух противоположно направленных процессов: с одной стороны, скоростью разрушения пены на поверхности горючей жидкости, а с другой, интенсивностью подачи пены. Если интенсивность подачи пены превышает скорость ее разрушения, то локальный слой на поверхности образуется сразу, и поскольку скорость разрушения пены со временем уменьшается вследствие охлаждения горючей жидкости выделяющимся из пены отсеком, то одновременно увеличивается и скорость нарастания этого слоя и растекание его по поверхности горючей жидкости. Если же интенсивность подачи пены меньше скорости ее разрушения, то локальный слой образуется не сразу, а спустя определенный промежуток времени, в течение которого температура горючей жидкости снизится настолько, что процесс подачи пены начнет превышать ее разрушение.
- Охлаждение прогретого слоя горючей жидкости отсеком пены приводит к тому, что уменьшается скорость испарения жидкости, вследствие этого уменьшается концентрация горючего в зоне горения, скорость химической реакции, скорость тепловыделения, и, как конечный результат - температура горения.

- 2. Как только образуется локальный слой пены на поверхности ГЖ, он экранирует часть горючей жидкости от лучистого теплового потока пламени и охлаждает верхний прогретый слой. Это приводит к тому, что температура прогретого слоя горючей жидкости падает и, как следствие, уменьшается количество паров, поступающих в зону горения, снижается скорость реакции окисления, количество выделяющегося тепла и температура горения.

- 3. При достижении на поверхности жидкости слоя пены определенной толщины он препятствует поступлению выделяющихся паров горючей жидкости к зоне горения. Следовательно, пена изолирует горючую жидкость (точнее, ее пары) от зоны горения и горение прекращается. Кроме перечисленных основных трех факторов, действующих при тушении пеной, существуют еще и дополнительные. К ним относятся; разбавление горючей смеси в зоне горения парами воды: при разрушении пены раствор пенообразователя (в основном вода) частично испаряется, а частично стекает вниз. Образовавшиеся пары вместе с парами ГЖ поступают в зону горения.
- Это приводит к снижению концентрации в зоне горения, а следовательно, к уменьшению скорости реакции тепловыделения и температуры горения; охлаждение зоны горения парами воды. Пары воды, попавшие в зону горения, не только снижают концентрацию горючего в объеме зоны горения, но и охлаждают эту зону. Это увеличивает потери тепла из зоны реакции, а следовательно, уменьшает температуру горения.

- Таким образом, надежное тушение может быть достигнуто при подаче на поверхность горючей жидкости такого слоя пены, через который пары горючей жидкости не смогут прорваться в зону горения. Поэтому воздушно-механическая пена относится к изолирующим огнетушащим средствам. Изолирующая способность пены зависит от таких параметров, как парогазонепроницаемость, коэффициент динамической вязкости, напряжение сдвига, которые, в свою очередь, определяются кратностью пены, ее дисперсностью, толщиной стенки пузыря и др.
- Рассмотрим изолирующую способность пены. Предположим, что на горящую жидкость равномерно подан слой пены определенной толщины и эта толщина в течение времени не меняется (квазистационарный случай). Необходимо определить, какую минимальную высоту должен иметь слой пены, чтобы пузырь, несущий в себе пары ГЖ, прорвался через него (рис.).

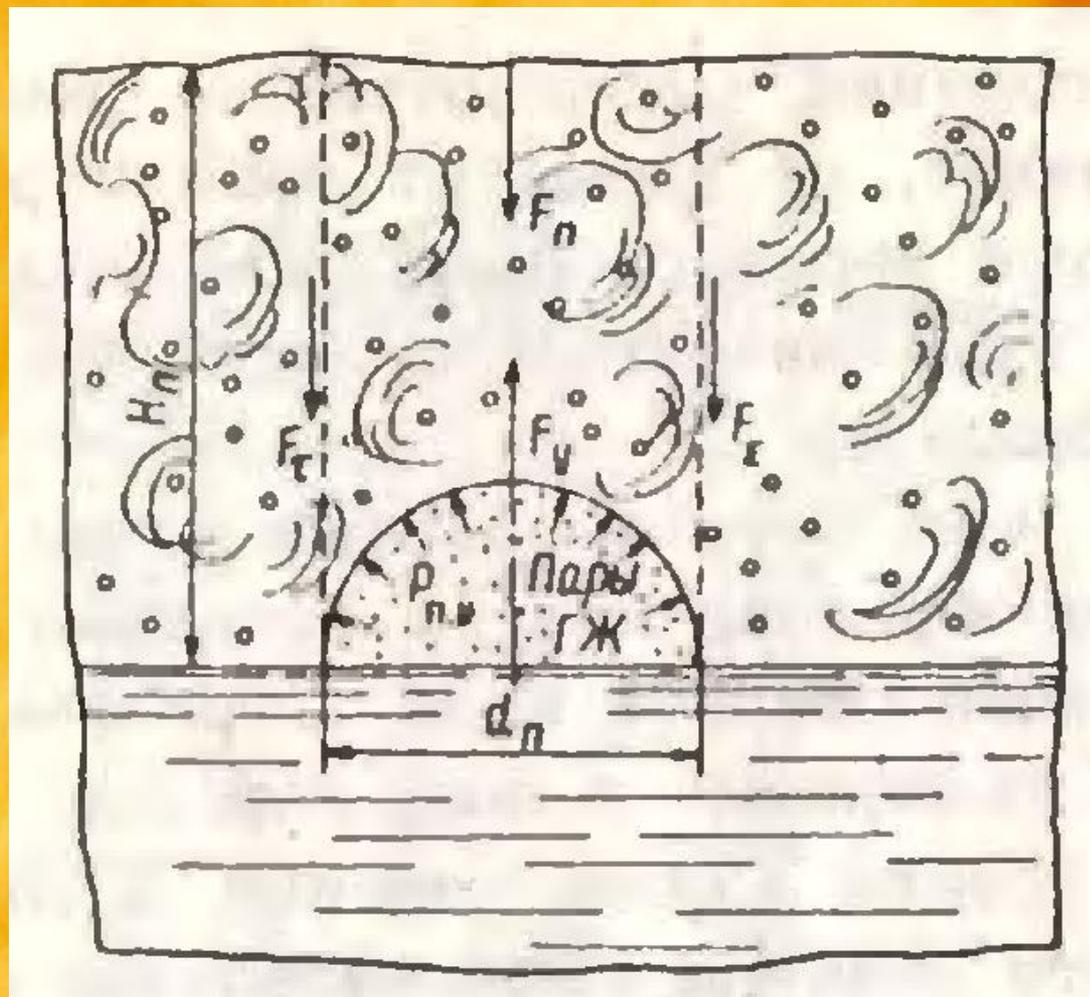


Схема прорыва пузыря ГЖ через слой
воздушно-механической пены

- Определим, какие силы действуют при взаимодействии пузыря паров горючей жидкости со слоем пены. На слой не действует сила давления паров горючей жидкости F_y , ей противостоят сила внутреннего напряжения пенного слоя F_r и сила, обусловленная массой пены F_{Π} :

$$F_y = \rho_{пу} * \frac{\pi d_{\Pi}^2}{4} \quad F_r = r * \pi * d_{\Pi} * H_{сл}$$

$$F_{\Pi} = \frac{\pi * d_{\Pi}^2}{4} * \rho * \left(H_{сл} - \frac{d_{\Pi}}{3} \right)$$

- где $\rho_{пу}$ - давление паров упругости жидкости.

- Пузырь паров горючей жидкости не всплывет, если будут соблюдены два условия:

- $H_{\text{сл}} > d_{\text{п}}; \quad F_y \leq F_{\text{п}} + F_r.$

- после подстановки в него всех значений :

$$H_{\text{min}} = \frac{\rho_{\text{пу}} - \rho \frac{d_{\text{п}}}{3}}{\frac{\Delta r}{d_{\text{п}}} + \rho_{\text{п}}}$$

- Выражение характеризует изолирующую способность пены в зависимости от ее параметров. Таким образом, огнетушащая эффективность пены может быть оценена по величине которая является функцией в основном четырех параметров: кратности, дисперсности, вязкости и стойкости пены.

Применение пен.

- Пена является достаточно универсальным огнетушащим средством и используется для тушения жидких и твердых веществ. Исключение составляют гидрофильные жидкости, электро- и радиоустановки и вещества, взаимодействующие с водой.
- Применение пены для тушения пожаров было предложено в ^[L]_[SEP]1904 г. русским инженером А.Г. Лораном. Им была получена химическая пена на основе водного раствора сернокислого алюминия и бикарбоната натрия с добавкой в качестве пенообразователя солодкового экстракта. А. Г. Лоран высказал идею получения воздушно-механической пены и применения ее для тушения пожаров, однако реализовалась эта идея значительно позже.

- Химическая и воздушно-механическая пены представляют собой грубодисперсные системы, в которых дисперсной фазой является какой-либо газ (CO_2 , N_2 , воздух химически активный ингибитор), а дисперсионной средой - раствор ПАВ в воде.
- Для тушения пожаров с успехом применялась химическая пена. Ее получали из пеногенераторного порошка марки ПГП путем растворения его в воде. Порошок ПГП состоит из кислотной $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ и щелочной частей NaHCO_3 и ПАВ. Химическая пена имеет кратность 5, состоит из 80% CO_2 , 19,7% водного раствора Na_2SO_4 и $\text{Al}(\text{OH})_3$ и ПАВ. Применялась химическая пена в основном при тушении нефтепродуктов, так как обладала высокой стойкостью на поверхности горящего нефтепродукта и хорошо растекалась по его поверхности.
- В настоящее время для тушения пожаров применяется воздушно-механическая пена. Она состоит из 83-99,6% воздуха и 0,4-17% раствора поверхностно-активного вещества.

- В качестве поверхностно-активных веществ в пожарной охране применяются:
- **анионоактивные ПАВ** - «Прогресс», сульфонолы НП-1 и НП-5, смачиватель НБ, пенообразователи ПО-1, ПО-3, ПО-6, мылонафт, синтол, ДНС и др.;
- **неионогенные ПАВ** - смачиватель ДБ, препарат ОС-2О, эмульгатор ОП-4, вспомогательные вещества ОП-7, ОП-Ю. Наиболее распространенное ПАВ-пенообразователь ПО-1. Он представляет собой смесь натриевых солей сульфокислот различного строения. Получается в результате нейтрализации контакта Петрова едким натрием. После нейтрализации к продукту добавляется костный клей и спирт. ПО-1 представляет собой жидкость, хорошо растворимую в воде. Плотность ПО-1 равна 1,1-1,15 г/см₃, содержание сульфосолей составляет 55%.
- Воздушно-механическая пена электропроводка, поэтому для тушения пожаров электроустановок, радиоустановок, электронной техники, электродвигателей, агрегатов транспортных средств и т.д., находящихся под напряжением, не допускается.

Порошковые огнетушащие средства

- В настоящее время для тушения пожаров широкое применение находят порошковые огнетушащие составы (ПОС). По своему назначению они условно делятся на составы общего и специального назначения.
- Порошковые составы общего назначения - для тушения пожаров класса АВСЕ. Согласно зарубежной классификации, это соответствует пожарам: А - твердых горючих веществ и материалов, В - горючих жидкостей, С - горючих газов, Е - электроустановок, находящихся под напряжением. Порошковые составы специального назначения применяются для тушения пожаров класса D и других - пожаров, связанных с горением легких и щелочных металлов и их сплавов (т.е. там, где неприменима вода и все виды огнетушащих составов на водной основе). В ряде случаев порошковые составы являются единственным видом огнетушащих средств, пригодных для тушения тех или иных характерных специфических пожаров.

- **Виды порошковых огнетушащих средств и их состав.**

- Порошковые огнетушащие средства представляют собой тонкодисперсные порошки негорючих твердых веществ, основной составной частью которых являются соли и окислы, например, углекислая и двууглекислая сода, квасцы, поташ, окись кремния, и другие. Дисперсность их достигает 15-20 мкм. В нашей стране наибольшее распространение получили порошковые составы на основе бикарбоната натрия и фосфата аммония. Это, например, составы типа ПСБ на основе бикарбоната натрия, которые успешно применяются для тушения горючих газов, жидкостей, аппаратуры и электроустановок, находящихся под напряжением. Состав типа П-1 и ПФ на основе фосфатно-аммонийных солей применяется при тушении углеродистых твердых горючих материалов. В иностранной литературе принята другая система индексации порошков. Они либо имеют собственные 'фирменные' названия типа 'Monnex', 'Favorit', 'Granito' и др. Либо условно называются по классам пожаров, для тушения которых они рекомендуются. Например, ВСЕ (порошок на основе бикарбоната натрия); ABCDE (порошок на основе фосфатов аммония); соответственно первый - для тушения пожаров класса В, С и Е, а второй - для тушения пожаров класса А, В, С, D и Е. Для тушения пожаров, связанных с горением металлов, применяют так называемый М-порошок (различных составов).

- Порошки типа ПСБ (и ВСЕ) применяются наиболее широко, имеют наибольшую огнетушащую эффективность и содержат в своей основе: до 95-96% бикарбоната натрия NaHCO_3 ; 1-3% стеаратов металлов для улучшения гидрофобных свойств и 1-3% других добавок, повышающих их 'текучесть', снижающих склонность к слёживанию и комкованию и т.д. Исследования огнетушащей эффективности различных ПОС позволяют составить определенные представления о механизмах их действия. Установлено, что огнетушащая эффективность порошковых огнетушащих средств возрастает с ростом их дисперсности, практически для всех ПОС.

Дисперсность порошковых огнетушащих средств

Размер частицы, см	Число частиц в единице массы, шт.	Суммарная поверхность частиц, см ²
1	1	6
0,1	1000	60
0,01	10 ⁶	600
0,001	10 ⁹	6000
0,0001	10 ¹²	60000

- Число молекул H_2 в стехиометрической смеси $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ в 1 см^3 в зоне горения составляет $n = 1,7 \cdot 10^{18} \text{ 1/см}^3$, а количество химически активных радикалов в зоне такого пламени при температуре $T = 2000 \text{ К}$ составляет

$$n_{\text{акт}} = n_1 e^{-\frac{E}{RT}} ;$$

- $e^{-\frac{E}{RT}} = 1,7 \cdot 10^{-5}$, тогда $n_{\text{акт}} = 5 \cdot 10^{16} \cdot 1,7 \cdot 10^{-5} = 8,5 \cdot 10^{11}$.
- При тушении порошком количество эффективных соударений молекул и радикалов в зоне химической реакции горения будет значительно меньше, так как число нейтральных частиц порошка, образованных из 1 см^3 , соизмеримо с числом активных радикалов, оно составляет $n_{\text{пг}} = 10^{11} - 10^{12}$. Как видно, количество инертных частиц, полученных из 1 см^3 вещества, действующих по механизму разбавления горючей смеси, препятствующему соударению активных молекул горючего с окислителем, достаточно велико и вполне соизмеримо с количеством возбужденных частиц в зоне реакции.

- Значит, прежде всего ПОС действует по механизму простого физического разбавления реагентов в зоне химических реакций. Эти частицы малы по массе, а суммарная теплоемкость их и тепловоспринимающая поверхность очень велики. Поэтому прогреваются они быстро и отнимают большое количество тепла от зоны химических реакций.
- Рассмотрим более подробно действие этого механизма. При прохождении через фронт пламени частицы порошка отнимают часть тепла от него, передаваемого им свежей газовой смесью. В этом случае тепловой баланс относительно фронта пламени равен:

$$Q_{\text{конв}} = Q_{\text{хим}} - Q_{\text{погл}}$$

- где $Q_{\text{конв}}$ - плотность потока конвективного переноса тепла массой газа;
- $Q_{\text{хим}}$ - плотность потока тепла химической реакции;
- $Q_{\text{погл}}$ - плотность потока тепла, поглощаемого твердыми частицами.

- Плотность потока конвективного тепла, переносимого газом через фронт пламени, определяется равенством:

$$Q_{\text{конв}} = u_{\text{конв}} \rho_{\Gamma} C_{P_{\Gamma}} (T_{\Gamma} - T_1)$$

- где $u_{\text{конв}} \cdot \rho_{\Gamma}$ - массовая скорость переноса тепла газом; [SEP]
- C_p — средняя теплоемкость газа.
- Плотность потока тепла химической реакции будет равна:

$$Q_{\text{хим}} = u_{\text{н}} \rho_{\Gamma} C_{P_{\Gamma}} (T_{\Gamma} - T_1)$$

- где $u_{\text{н}}$ - нормальная скорость распространения пламени в чистой горючей смеси.

- Плотность потока тепла, отбираемого от фронта пламени частицами порошка, может быть определена по формуле

$$Q_{\text{ПОГЛ}} = u_{\text{КОНВ}} C_{\text{П}} C_{P_{\Gamma}} (T_{\Gamma} - T_1)$$

- где $C_{\text{П}}$ - концентрация частиц порошка в горючей смеси.
- Тепло, воспринимаемое частицами порошка, определяется по уравнению:

$$Q_{\text{ПОГЛ}} = n_{\Gamma} \pi d_{\text{ср}}^2 \alpha_{\text{П}} (T_{\Gamma} - T_1)$$

- где n_{Γ} - количество частиц порошка в горючей смеси;
- $d_{\text{ср}}$ - средний диаметр частицы, которая предполагается сферической;
- $\alpha_{\text{П}}$ - коэффициент теплопередачи от газа к частице порошка.

- Считая, что при тушении пожара порошок равномерно распределяется в зоне горения и что через единицу поверхности горения в равные промежутки времени проходит одинаковое количество порошка, можно определить количество частиц порошка, находящихся в данный момент на единичной поверхности фронта пламени по формуле

$$n_{\Gamma} = \left(\frac{C_{\Pi}}{\frac{1}{3} * \pi d_{cp} \rho_{\Pi}} \right)^{2/3}$$

- где ρ_{Π} - плотность порошка.
- Для тел очень малого размера коэффициент теплопередачи от газа к твердой частице можно рассчитать по формуле и принять равным: $\frac{\alpha_{\Pi} d_{cp}}{\lambda_{\Gamma}} = 2$
- где λ_{Γ} - средняя теплопроводность газа.

- После преобразования получим зависимость нормальной скорости пламени от концентрации порошка:

$$\frac{u_H^{\Pi}}{u_H} = 1 - \frac{\left(\frac{C_{\Pi}}{1/6 * \pi \rho_{\Pi}} \right)^{2/3} 2\pi \frac{\lambda_{\Gamma}}{\delta}}{\rho_{\Gamma} C_{P_{\Gamma}} u_H}$$

- Экспериментально установлено, что на снижение нормальной скорости распространения пламени большое влияние оказывает размер частиц, чем меньше средний диаметр частиц, тем эффективность тушения возрастает. Так, при концентрации нейтральных твердых частиц в пропано-воздушной смеси, равной 30 г/м^3 при размере частиц $d_{\text{cp}} = 8,3$ мк, нормальная скорость пламени меньше, чем в чистой смеси, на 7%, при размере $d_{\text{cp}} = 5,4$ мк меньше на 15%, а при размере частиц $d_{\text{cp}} = 1,6$ мк она составляла 60% от нормальной скорости чистой пропано-воздушной смеси. При концентрации 65 г/м^3 частиц с $d_{\text{cp}} = 1,6$ мк наблюдалось тушение пропано-воздушного пламени. Более крупными частицами в диапазоне концентраций 0 - 100 г/м^3 тушения пропано-воздушного пламени не наблюдалось.

- Исследованиями также установлено влияние физико-химических свойств горючей смеси на степень снижения нормальной скорости пламени инертными твердыми частицами. Одна и та же концентрация инертного порошка по-разному действует на водородо- и пропано-воздушные горючие смеси. При одной и той же концентрации инертный порошок снижает нормальную скорость распространения пламени в пропано-воздушной смеси в 1,5 раза больше, чем в водородо-воздушной смеси. При изменении концентрации инертного порошка в водородо-воздушной смеси в диапазоне концентраций 0-100 г/м³ тушения пламени не наблюдалось.
- Кроме того, эти частицы, попадая в зону химических реакций и отнимая тепло от фронта пламени, действуют по механизму 'холодной' стенки.

- Для высокодисперсных порошков при объемном тушении расстояния между отдельными частицами в зоне горения очень малы и образованные между ними каналы имеют размер значительно меньше критического, т.е. при введении порошка в объем проявляется эффект холодной стенки. Число частиц порошка в кубе со стороной α_B

равно:

$$n = \left(\frac{\alpha}{x} \right)^3$$

$$G_{\Pi} = \frac{\pi}{6} d_{cp} \rho_{\Pi} n = \frac{\pi}{6} \rho_{\Pi} \left(\frac{\alpha^* d_{cp}}{x} \right)^3$$

- Масса частицы порошка равна:
- d_{cp} - характеристический размер частицы порошка.
- Масса воздуха в выбранном объеме будет равна:

$$G_{T.CM} = G_B = \rho_B \alpha^3$$

- (объемом частиц порошка пренебрегаем).

- Для объемного тушения порошками огнетушащие концентрации составляют 50-200 г/м . Тогда $G_{\Pi}/G_B=0,05+0,2$;

$$\frac{G_{\Pi}}{G_B} = \frac{\frac{\pi}{6} \rho_{\Pi} \left(\frac{\alpha * d_{cp}}{x} \right)^3}{\rho_B \alpha^3} = \frac{\pi \rho_{\Pi} d_{cp}^3}{6 \rho_B x^3}$$

$$\frac{x}{d_{cp}} = \sqrt[3]{\frac{\pi}{6} * \frac{\rho_{\Pi}}{\rho_B} * \frac{1}{(0,05 \div 0,2)}} = \sqrt[3]{\frac{3,14(1000+1200)}{61,225(0,05 \div 0,2)}} = 13 \div 20$$

- Отсюда $x=(13 \div 20)d_{cp}$.
- Если $d_{cp} = 20$ мк, то $x \sim 0,26 \div 0,4$ мм, что значительно меньше критического диаметра, так как для большинства углеводородных смесей критический диаметр имеет величину $2 \div 3$ мм.

- Если поверхность твердых частиц не нейтральна, а химически активна по отношению к радикалам зоны химических реакций, то они еще более эффективны и действуют как газообразные ХАИ. Например,
- $\text{МОН} + \text{Н} \rightarrow \text{Н}_2\text{О} + \text{М};$
- $\text{МОН} + \text{ОН} \rightarrow \text{Н}_2\text{О} + \text{МО},$
- где М - это К, Na и др., т.е. $\text{А} + \text{П} \rightarrow \text{АП};$
- $\text{АП} + \text{А} \rightarrow \text{АА} + \text{П},$
- где А - активная частица (радикал);
- П - твердая поверхность частиц.
- Эффективность таких ингибиторов тем выше, чем легче они отдают электрон радикалам. Так происходит дезактивация активных центров.

- Таким образом, существенен и механизм гетерогенной рекомбинации активных центров химической реакции на поверхности твердых частиц порошковых огнетушащих составов. Если частицы ПОС, находясь в зоне химической реакции, разлагаются, сублимируют, выделяя газовые компоненты, то очевидно, что и этот эндотермический процесс ведёт к дополнительному отводу тепла от зоны химических реакций и к разбавлению ее парами и газами, а если ещё испарившиеся продукты являются ХАИ, как в случае составов типа СЦ, когда силикагель пропитывается жидким фреоном F 114B2 ($C_2F_4Br_2$), то к этому добавляется еще и механизм химического ингибирующего воздействия продуктов разложения ПОС. Если же частицы порошка не полностью разложились и испарились в зоне химической реакции, то, оседая вниз, они покрывают поверхность горючих материалов (если тушат ТГМ) и оказывают экранирующее и изолирующее воздействие на горючие материалы, препятствуя доступу воздуха в зону пиролиза горючих материалов и выходу горючих продуктов разложения.
- Как видно, механизмы прекращения горения ПОС многообразны, а доминирующий механизм зависит от вида горючего, режима горения, вида применяемого ПОС и даже от способов подачи его в зону горения.

- Для тушения пламени газового фонтана наиболее целесообразно применение ПОС с объемными механизмами прекращения горения: разбавление, химическое ингибирование, гетерогенная рекомбинация активных центров химических реакций и т.д.
- А это, в свою очередь, определяет и способ, и зону их наиболее эффективной подачи: рассредоточение, объемно, 'снизу вверх', преимущественно в факел пламени.
- При тушении щелочных металлов, когда основным является механизм 'изоляции', 'экранирования' и хоть и слабого, но охлаждающего действия порошковой массы на поверхности ТГМ, подача ПОС должна осуществляться таким образом, чтобы образовался более толстый слой порошка на поверхности ТГМ (т.е. 'сверху вниз' или 'сбоку', 'компактно', 'сосредоточенно' и т.д.), чтобы аэродинамические силы факела пламени и газовые потоки вокруг зоны горения унесли как можно меньше порошка.

- Достоинствами ПОС является их универсальность и высокая огнетушащая эффективность. Им свойствен и целый ряд недостатков. Большинство ПОС гидрофильны, склонны к отсыреванию, увлажнению, слёживанию и комкованию. Порошковые составы сложно подавать в зону горения: их трудно 'забирать' из объема, где они находятся, для подачи в нагнетающее устройство им трудно сообщить большой запас механической энергии (они 'не работают' в насосах, в системах нагнетания); их трудно транспортировать по трубопроводам и подавать в 'свободном полете' в зону горения. Поэтому для 'забора', 'транспортировки, и 'подачи' ПОС в зону горения применяют преимущественно пневмотранспорт. Максимальная дальность помета струи воздушно-порошковой смеси в этом случае редко превышает 10-15 м для ручных стволов и 20-25 м для лафетных, а длина подающих шлангов не превышает 50—60 м. Для гидрофобизации ПОСов применяют различные способы обработки их, вводят добавки, которые препятствуют слёживанию и повышают скольжение частиц, т.е. придают порошковым составам свойства 'текучести'. К их числу относятся стеараты металлов (стеарат алюминия, стеарат железа или магния), стеариновая кислота, графит. Для обработки порошковых составов применяют силиконовые жидкости, добавляют тальк, флюсы и т.п.

- Область применения порошковых огнетушащих средств общего назначения (типа ПФ, П):
- предназначены для тушения горючих веществ и материалов во всех трех агрегатных состояниях (горючие газы, ЛВЖ-ГЖ, твердые горючие материалы) и электроустановки под напряжением до 1000 В.
- Непригодны для тушения металлов, металлоорганических жидкостей, щелочных металлов, пиррофорных веществ и их сплавов.

- Область применения порошковых огнетушащих средств **специального назначения (типа ПС, СИ):**
- предназначены для тушения щелочных и щелочноземельных металлов, пирофорных материалов, алюмоорганических соединений. [SEP]
- Механизм тушения как объемного действия, за счет выделения газообразных ХАИ, так и поверхностно изолирующего действия твердой массы остатков силикагеля.

- 
- Расход ППС и интенсивность их подачи при тушении пожаров определяется экспериментально.
 - Расчет интенсивности подачи ППС ведется в основном на единицу площади пожара.
 - Данные по тушению различных горючих материалов порошковыми огнетушащими средствами являются справочным материалом.

Вода как огнетушащее средство

- Вода является одним из наиболее широко распространенных и наиболее универсальных средств, применяемых для тушения пожаров. Она эффективна при тушении пожаров, связанных с горением веществ, находящихся во всех трех состояниях. Поэтому ее широко применяют для тушения пожаров практически повсеместно, кроме тех редких случаев, когда ее применить нельзя. Воду нельзя применять для тушения пожаров в следующих случаях: нельзя тушить горючие вещества и материалы, с которыми вода вступает в интенсивное химическое взаимодействие, с выделением тепла или горючих компонентов (например, пожары, связанные с горением щелочных и щелочно-земельных металлов, металлов типа лития, натрия, карбида кальция и других, а также кислот и щелочей, с которыми вода бурно взаимодействует); водой нельзя тушить пожары, с температурой выше $1800-2000^{\circ}\text{C}$, так как при этом возникает интенсивная диссоциация паров воды на водород и кислород, которые интенсифицируют процесс горения; нельзя тушить пожары, при которых применение воды не обеспечивает требуемых условий безопасности для личного состава. Например, пожары электроустановок, находящихся под высоким напряжением, и т.д.

- Во всех остальных случаях вода является надежным, эффективным средством для тушения пожаров и поэтому она нашла наиболее широкое применение. Вода обладает рядом достоинств как огнетушащее средство; термической стойкостью, намного превышающей термическую стойкость других негорючих жидкостей, высокой теплоемкостью и теплотой испарения, относительной химической инертностью. К отрицательным свойствам воды относятся: высокая температура замерзания и аномалия изменения плотности воды при охлаждении, что затрудняет ее применение при низких отрицательных температурах, сравнительно малая вязкость и высокий коэффициент поверхностного натяжения, ухудшающие смачивающие способности воды и тем самым снижающие коэффициент ее использования в процессе тушения, а также электропроводность воды, содержащей примеси.

- Основные физико-химические свойства воды следующие:
- плотность $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$;
- температура замерзания $t_{\text{зам}} = 0^\circ\text{C}$;
- температура кипения $t_{\text{кип}} = 100^\circ\text{C}$;
- плотность насыщенного водяного пара при 100°C и $\rho = 98.1 \cdot 103 \text{ Па}$;
- $\rho_{\text{п}} = 0,6 \text{ кг/м}^3$;
- критическая температура $t_{\text{крит}} = 374^\circ\text{C}$;
- удельная теплоемкость жидкости $C_{\text{ж}} = 4,19 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$; удельная теплоемкость паров (в диапазоне температур от 100 до 1000°C) $C_{\text{р}} = 2,52 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$;
- скрытая теплота парообразования $r = 2260 \text{ кДж/кг}$;
- Коэффициент поверхностного натяжения $\sigma_{\text{в}} = 7,25 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$;
- Коэффициент динамической вязкости $\mu_{\text{в}} = 10^{-3} \text{ Н с / м}^2$
- удельная электрическая проводимость (чистой воды) при 20°C – $1/R = 400 \text{ 1/Ом} \cdot \text{м}$.
- *Незначительное термическое разложение воды ($\sim 0,2\%$) начинается при температуре около 1500°C , что значительно выше обычных температур на пожаре.

- По механизму прекращения горения вода относится к категории охлаждающих огнетушащих средств. Но сам механизм прекращения горения зависит от режима горения, от вида горючего и его агрегатного состояния.
- При тушении пожаров, связанных с горением горючих газов (всегда) и жидкостей (иногда) доминирующим механизмом прекращения горения является охлаждение зоны горения, который реализуется в случае применения объемного метода тушения. Поэтому рассмотрим сначала механизм прекращения процессов горения водой при объемном методе, который применяется при тушении пожаров, связанных с горением горючих газов, жидкостей и ТТМ.

- При объемном методе тушения (разбавлением, ингибированием цепных реакций или охлаждением зоны реакций) наиболее целесообразно подавать огнетушащее средство в зону горения или в зону протекания химических реакций горения «объемно», т.е. заполняя им максимально возможную часть объема в зоне горения. Воду можно подавать в зону горения в виде компактных струй, распыленных струй и тонкораспыленной воды. Два последних случая наиболее полно соответствуют понятию объемной подачи жидкого огнетушащего средства в зону горения. Компактная струя, пройдя сквозь зону горения, не окажет на нее почти никакого воздействия, да и сама практически не испытает сильного влияния пламени. Далее, взаимодействуя с горячим материалом, она окажет на него некоторое воздействие, но оно будет не столь эффективным. Через слабую струю газа водяная струя также пройдет без всякого взаимодействия, не влияя на состояние газа (или газовой смеси) и не испытывая особого воздействия от него.

- При взаимодействии компактной водяной струи с интенсивным газовым потоком (у самого устья скважины, где огромные скорости потока газа, сравнительно большая плотность и высокий газодинамический напор), она раздробится, а если их много, то они раздробят и газовую струю. Но в условиях пожара - это процесс трудно управляемый и трудно регулируемый. Поэтому подавать компактную струю в факел пламени горящих газов нецелесообразно.

- Компактную струю можно подавать в следующих случаях.
- 1. Когда необходимо 'поднять' нижнюю кромку факела пламени, т.е. увеличить 'мертвую зону". Например, для применения способа тушения взрывом ВВ или с помощью АГВТ для вывода на боевую позицию технических средств тушения, технических устройств для аварийно-восстановительных работ и т.д.
- 2. Когда личному составу невозможно подойти к фонтану на оперативную дистанцию для выполнения боевых действий по тушению и вспомогательных работ; для защиты от загорания близлежащих объектов и т.д.
- будут их охлаждать и тем самым будут мало способствовать тушению.

- При тушении ЛВЖ и ГЖ компактная струя также не окажет на факел пламени почти никакого воздействия. А попав на поверхность ЛВЖ и ГЖ, она будет не очень эффективно ее охлаждать. Из-за большого удельного веса воды по сравнению с горючими углеводородами она быстро опустится на дно. Охлаждение прогретых до температуры кипения поверхностных слоев горючей жидкости будет не столь интенсивным, как если бы была подана распыленная или тонко распыленная вода. При тушении ТГМ компактные струи воды, поданные в факел пламени, также, как и в первых двух случаях, не окажут влияния на зону горения, а попав на поверхность ТГМ, они не очень эффективно будут их охлаждать и тем самым будут мало способствовать тушению.
- Мощные компактные струи воды подают при тушении крупных развившихся пожаров штабелей древесины, так как при таком интенсивном горении распыленные струи, а тем более тонкораспыленная вода не долетят не только к горящей древесине, но даже не попадут внутрь факела пламени. Они испарятся во внешних зонах факела пламени или унесутся вверх интенсивными газовыми потоками, практически не повлияв на процесс горения.

- Во всех остальных случаях распыленные струи и тонкораспыленная вода более эффективны как при тушении пожаров объемным способом, так и при тушении по поверхности горючего материала. При прекращении пламенного горения компактная струя менее эффективна потому, что, пропетаая сквозь зону горения, не обеспечивает охлаждающего воздействия, так как она имеет небольшую площадь поверхности контакта с пламенем и малое время взаимодействия. Тогда как распыленные струи имеют значительно большую поверхность контакта с факелом пламени и меньшую скорость пропета - большее время взаимодействия. А еще лучше условия теплоотвода из факела пламени у тонкораспыленной воды. По законам теплопередачи количество тепла, отнимаемое телом от газовой среды, описывается уравнением вида:

$$Q = Sr\alpha(T_{Г.С} - T_{П})$$

- Значит, чем больше поверхность контакта жидкости с факелом пламени и время этого контакта при прочих равных условиях, тем интенсивнее теплоотвод. Очень малое тепловое и аэродинамическое взаимодействие с факелом пламени у компактной струи, большее - у распыленной, еще большее - у тонкораспыленной воды, подаваемой в зону пламени. Наибольший эффект тушения при подаче воды в факел пламени будет в том случае, когда ее охлаждающий эффект будет максимальным. То есть когда вся поданная на тушение пожара вода испарится за счет отвода тепла от факела пламени, непосредственно из зоны протекания химических реакций горения. Поэтому при таком механизме прекращения горения следует стремиться к тому, чтобы максимально возможное количество воды испарялось в объеме факела пламени, а не за его пределами. А при тушении водой путем подачи ее на поверхность горючих жидкостей или ТГМ более равномерная подача распыленной воды эффективна потому, что максимальный охлаждающий эффект будет иметь место при полном испарении всей поданной на тушение пожара воды за счет отъема тепла от горючего материала. Поэтому вода должна находиться в контакте с поверхностными (наиболее прогретыми) слоями ЛВЖ, ГЖ или ТГМ до полного ее испарения.

- Наибольшее время контакта капли с факелом пламени будет при скорости полета капли, близкой к скорости витания, т.е. когда сила веса капли уравновешена силой аэродинамического взаимодействия капли с потоком газа. Откуда скорость витания капли в зависимости от соотношения плотностей жидкости и газа и диаметра капли, можно найти по формуле

- $$d_K = \frac{3}{4} C_X \frac{\rho_G v_{ВИТ}^2}{g \rho_{жс}} \quad \text{или} \quad r_K = \frac{3}{4} C_X \frac{\rho_G v_{ВИТ}^2}{2} * \frac{1}{\rho_{жс} g}$$

- Поверхность теплообмена будет тем больше, чем меньше диаметр капли. Если капли очень маленького диаметра ($d_k \ll d_{\text{квит}}$), то поверхность их контакта будет достаточно большая, масса капель незначительна, но при подаче извне они не дойдут до зоны пламени, а унесутся вверх конвективными газовыми потоками и не повлияют на процесс горения. Значит размер капель, т.е. степень их дисперсности (мелкость их распыла) и одновременно время пребывания их в зоне горения должны быть таковы, чтобы произведение этих параметров было максимальным (т.е. $S_{\Sigma}^* \text{ г} \rightarrow \text{max}$). Это условие обеспечит максимальный отвод тепла из зоны химических реакций горения.

Механизм прекращения пламенного горения водой.

- Если в факел пламени подать тонкораспыленную воду, то значительная ее часть или почти вся вода испарится, отняв максимальное количество тепла. Допустим, что вся вода, поданная в зону пламени, полностью испарится. Рассмотрим механизмы прекращения горения для этого случая. Основные механизмы отвода тепла и механизмы прекращения горения будут следующие: снижение температуры в факеле пламени из-за затрат тепла на нагревание капелек воды до температуры кипения:

$$q_1 = C_B m_B \Delta t = c_B m_B (t_{\text{кип}} - t_0)$$

- снижение температуры в факеле пламени из-за затрат тепла на парообразование (т.е. на испарение)
- $q_2 = r \cdot m_B$
- снижение температуры факела пламени за счет смешения паров воды при $t = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ и реагентов в зоне реакции и затраты тепла на нагревание паров воды до температуры среды в зоне горения
$$q_3 = C_P^{ВП} m_B \Delta t_{П} = c_P^{ВП} m_B (t_{ПЛ} - 100)$$
- разбавление компонентов горючей смеси в зоне химической реакции горения парами воды;
- изменение теплофизических свойств газовой среды в зоне горения
- $C_{P_{см}}$; $\lambda_{см}$ и др.

- Оценим, приблизительно, удельные расходы воды и требуемые интенсивности подачи ее для эффективного тушения факела пламени при всех трех агрегатных состояниях горючих материалов по механизму прекращения горения только за счет охлаждения зоны реакции.
- Максимальная температура факела диффузионного пламени любого горючего вещества или материала составляет 1200-1300 °С и очень редко превышает 1350 °С. Так, температура пламени горючих газов при диффузионном горении в – открытом пространстве составляет 1250-1300 °С (кроме водорода), горючих жидкостей при тех же условиях - 1200-1250°С, твердых горючих веществ и материалов - 1150-1200°С.
- Согласно тепловой теории потухания пламени, условно принято, что температурой потухания для большинства углеводородных горючих веществ и материалов является 1000 °С.

- Предположим, что начальная температура реагентов, т.е. смеси горючего с окислителем (смеси «горючего газа с воздухом или паров ЛВЖ, ГЖ с воздухом) была равна $T_0=300 \text{ K}$ (т.е. если взять их при 'нормальных' условиях $\sim 27^\circ\text{C}$), а наивысшая температура продуктов горения примерно равная температуре факела пламени, $t_{\text{пл}} = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ или $T_{\text{пл}}=1500 \text{ K}$. Это значит, что температура среды в зоне горения повысилась приблизительно на 1200 K .
- На повышение температуры в зоне горения пошло примерно 60% всей теплоты сгорания данного вида горючего ($\sim 0,6$), (за вычетом потерь на излучение в окружающую среду, на которое пошло $\sim 0,4 Q_{\text{H}}^{\text{P}}$). А снизить температуру факела пламени необходимо на $\Delta T_{\text{ПОТ}}=200 \text{ K}$, т.е. $200/1200=0,17$, т.е. примерно на $1/6$ прироста температуры в зоне горения или на 17% .

- Если предположим, что прирост температуры продуктов горения пропорционален количеству тепла, выделяемого в результате химических реакций горения, за вычетом теплопотерь на излучение, то для потухания пламени необходимо снизить количество выделяемого тепла еще на $\sim 17\%$ или отвести от факела пламени дополнительно 17% тепла из тех 60% , которые идут на повышение температуры зоны реакции $\Delta Q_{\text{отв}} = 17\% Q_{\text{пл}}$, где $Q = 60\% Q_{\text{H}}^{\text{P}}$.
- Это значит, что при тушении пламени по механизму прекращения горения охлаждением зоны горения для диффузионных пламён горючих газов, паров ЛВЖ, ГЖ и твердых горючих материалов, необходимо отвести от зоны горения дополнительно $1/6$ часть тепла, идущего на повышение температуры среды в факеле пламени, что составляет $1/6 \cdot 60\% Q_{\text{H}}^{\text{P}}$, т.е. $\sim 10\%$ от их теплоты сгорания.

- Поскольку теплота сгорания большинства газообразных и жидких углеводородных горючих веществ редко превышает $[SEP](40 \div 50) 10^3$ кДж/кг, то для этого вида горючих удельное количество тепла, которое следует дополнительно отвести от диффузионного пламени для его тушения по механизму прекращения горения охлаждением зоны горения, составляет:

$$\Delta Q_{OTB}^{UD} = 0,1 Q_H^P = (4 \div 5) 10^3 \text{ кДж/кг.}$$

- Определим количество воды, требуемой для отвода такого количества тепла от зоны горения и тушения факела пламени по механизму прекращения горения охлаждением факела пламени.

- Количество тепла, отведенное водой в расчете на один килограмм будет равно:
- $Q_{\text{отв}}^{\text{уд(В)}} = m_{\text{В}} C_{\text{В}} \Delta t_{\text{В}} + m_{\text{В}} r_{\text{В}} + m_{\text{П}} C_{\text{р}} \Delta t_{\text{П}},$
- где $m_{\text{В}}$ - масса воды, принятая условно равной 1 кг;
- $C_{\text{В}}$ - теплоемкость воды, равная 4,2 кДж/(кг * °С);
- $\Delta t_{\text{В}}$ - диапазон прогрева воды от начальной температуры (условно примем ее равной 20°С) до Т кипения;
- $r_{\text{В}}$ - скрытая теплота парообразования, равная 2270 кДж/кг;
- $C_{\text{р}}$ - теплоемкость паров воды в диапазоне температур от 100 до 1000 °С, условно принятая равной ее среднему значению 2 кДж/(кг • °С);
- $\Delta t_{\text{П}}$ - диапазон нагрева паров воды в зоне пламени от 100 до 1000°С.

- Подставив численные значения входящих величин, получим:
- $Q_{\text{отв}}^{\text{уд(В)}} = 4400$ [кДж,/кг], т.е. один литр воды, введенной в зону горения при полном ее испарении и нагревании паров воды до наименьшей температуры пламени, способен отнять от факела пламени 4400 килоджоулей тепла.
- Это значит, что для тушения диффузионного факела пламени самых высококалорийных углеводородных горючих $c_{\text{SEP}}^{\text{L}} Q_{\text{H}}^{\text{P}}$ (40÷50) 103 кДж/кг нужно подать в факел пламени:

$$q_{\text{В}}^{\text{уд}} = \frac{\Delta Q_{\text{отв}}}{\Delta Q_{\text{отв}}^{\text{уд(В)}}} = \frac{0.1 Q_{\text{H}}^{\text{P}}}{4400} = 1 \quad (\text{кг/кг})$$

- т.е. примерно 1 л воды на килограмм горючей жидкости или на $c_{\text{SEP}}^{\text{L}}$ 1 кг горючего газа.

- Однако необходимо помнить, что полученные численные значения удельных расходов воды носят расчетно-теоретический характер. Практически невозможно осуществить подачу воды в факел пламени, доведя его до полного потухания, и при этом обеспечить полное испарение всей воды и нагревание ее паров до температуры газовой среды, т.е. до 1000 °С. Предположим, что не вся вода попадет при распыле в факел пламени, а только 80% ее, не вся вода, попавшая в факел пламени, нагреется до 100 °С, а лишь 90%, не вся нагретая до температуры кипения вода испарится, а только 75% ее и что пары воды прогреются примерно до 750 °С, то и в этом случае количество тепла, отведенное от факела пламени, будет равно:
 - $Q_{\text{уд}}^{(B)}_{\text{отв}} = k_1 k_2 m_1 C_B \Delta t_B + k_1 k_2 k_3 m_B r_B + k_1 k_2 k_3 k_4 m_{\text{п}} C_p^{\text{п}} \Delta t_{\text{п}}$,
 - где $k_1 = 0,8$; $k_2 = 0,9$; $k_3 = 0,75$; $k_4 = 0,75$.
 - Численные значения коэффициентов $k_1 - k_4$ приняты произвольно.

- Даже в этом случае после подстановки численных значений входящих величин получим $Q_{\text{отв}}^{\text{уд(B)}} = 2200$ кДж/кг; т.е. примерно вдвое меньше полученного ранее значения **. Соответственно и требуемые удельные расходы воды, необходимые для прекращения пламенного горения, будут в два раза больше полученных выше значений $q_{\text{уд}}^{\text{B}} = 0,1$ $Q_{\text{н}} = 2$ л/кг. Но и эти значения в 5-10 раз меньше реализуемых на практике. Это обстоятельство показывает, какие большие резервы повышения огнетушащей эффективности воды по механизму охлаждения факела пламени скрыты в совершенствовании способов подачи воды в зону горения, в повышении коэффициента ее использования в процессе тушения некоторых видов пожаров.
- Все приведенные выше расчеты были построены на тепловом эффекте тушения, без учета таких механизмов прекращения горения, как простое разбавление зоны реакции горения парами воды, изменение теплофизических свойств парогазовой смеси в зоне протекания химических реакций горения и т.д.
- **Несмотря на то, что численные значения коэффициентов $k_1 - k_4$ были выбраны произвольно, полученная величина $Q_{\text{отв}}^{\text{уд(B)}} = 2200$ кДж/кг хорошо согласуется с данными, полученными зарубежными исследователями экспериментальным путем прекращения пламенного горения твердых горючих материалов типа древесины.

- Как известно, стехиометрическая концентрация метана в метано-воздушных смесях $\sim 10\%$ по объему, т.е. из 1 м^3 горючего газа образуется приблизительно 10 м^3 горючей метано—воздушной смеси.
- Полученный удельный расход воды на тушение факела диффузионного пламени метана приблизительно равен 2 л/кг . Известно, что 1 л воды при полном ее испарении дает 1700 л водяного пара.
- Если предположить, что в процессе тушения испарилась вся поданная вода, то объем образовавшихся паров будет $V_{\text{ВП}} = 3,5 \text{ м}^3$, т.е. $d_{\text{ВП}} = 3,5 * 100/28 + 3,5 = 12\%$, т.е. почти на половину той концентрации, которая нужна для прекращения процесса горения разбавлением зоны горения.

- Рассмотрим механизм прекращения процессов горения на пожаре с помощью воды, используемой в качестве огнетушащего средства, - охлаждением горючих веществ и материалов. Таким способом можно тушить главным образом жидкие и твердые горючие материалы.
- Общее количество тепла, которое необходимо отвести из зоны горения по механизму прекращения горения охлаждением горючей жидкости, можно рассчитать по следующей схеме.

- Для жидкостей, не образующих гомотермического слоя, толщина прогретого слоя почти не зависит от времени горения и примерно постоянна для каждого вида горючей жидкости. Обычно эта толщина составляет от 3-5 мм до 3-5 см. Количество тепла, которое необходимо отвести от горючей жидкости, можно рассчитать по формуле
- $Q_{\text{отв}} = V_{\text{ж}} C_{\text{ж}} \Delta t = F_{\text{ж}} \delta_{\text{ПС}} (t_{\text{ж}} - t_{\text{всп}}) + k_t C_{\text{ж}}$,
- где $F_{\text{ж}}$ - площадь поверхности горючей жидкости (площадь резервуара);
- $\delta_{\text{ПС}}$ — толщина слоя жидкости, прогретого выше температуры вспышки;
- k_t - коэффициент, учитывающий форму профиля поля температур в поверхностном слое ($k_t \sim 0,5$);
- $C_{\text{ж}}$ - теплоемкость жидкости;
- $t_{\text{ж}} = t_{\text{кип}}$ - температура поверхностного слоя горючей жидкости, обычно равная температуре кипения горючей жидкости;
- $t_{\text{всп}}$ - температура вспышки горючей жидкости.*

*Предполагается, что температура вспышки горючей жидкости выше ее начальной температуры и температуры окружающей среды $t_{\text{всп}} > t_{\text{окр}}$

- Все эти величины можно найти по справочникам, кроме $\delta_{пс}$, которую определяют экспериментально, для каждого вида горючей жидкости.
- При длительном тушении, когда необходимо учитывать количество тепла, поступающее от факела пламени к зеркалу горючей жидкости, численное значение величины $Q_{отв}$ должно быть увеличено на

$$\Delta Q^{\Phi.П.} = q_{луч} F_{Г.Ж.} r_T$$

- где $q_{луч}$ - лучистый тепловой поток от факела пламени к зеркалу поверхности горючей жидкости; для ЛВЖ, ГЖ он обычно равен (0,02-0,03); r_T - время тушения.
- Тогда суммарное количество тепла, которое следует отвести от горючей жидкости водой, подаваемой на тушение пожара, будет равно:

$$Q'_{отв} = Q_{отв} + \Delta Q_{луч}^{ср.п}$$

- Для жидкостей, образующих в процессе горения гомотермический слой, задача расчета количества тепла, которое следует отвести от горючей жидкости для прекращения горения, осложняется тем, что толщина прогретого слоя пропорциональна времени свободного развития пожара:

$$Q_{отв} = F_{Г.Ж} v_{ГТ.С} r_{с.р} C_{ж} (t_{ГТ.С} - t_{всп})$$

- где $v_{ГТ.С}$ - скорость роста толщины гомотермического слоя горючей жидкости, м/с;
- $r_{с.р}$ - время свободного развития пожара;
- $t_{ГТ.С}$ - средняя температура гомотермического слоя горючей жидкости.
- Условием успешного тушения пожара по такому механизму прекращения процесса горения является выполнение неравенства $Q_{в} \geq Q_{отв}$

- Рассмотрим механизм прекращения горения и удельные расходы воды при применении ее в качестве охлаждающего огнетушащего средства для тушения пожаров твердых горючих материалов. При тушении пожаров, связанных с горением ТГМ водой полного прекращения процессов горения можно добиться только путем охлаждения до определенной температуры самого горючего материала.
- Во-первых, потому, что прекращение пламенного диффузионного горения еще не означает прекращения горения вообще, так как многие из них способны к гетерогенному горению (тлению). Во-вторых, поверхностный слой этих материалов в процессе горения прогревается до температуры, значительно превышающей не только температуру самовоспламенения, но даже температуру вынужденного зажигания (т.е. до температуры выше 500-600 С).

- Поэтому после прекращения пламенного горения над их поверхностью вновь создаются условия, достаточные для повторного воспламенения и продолжения горения. Поэтому условием полного и надежного, прекращения горения этих материалов является не только прекращение пламенного горения над их поверхностью, но и охлаждение поверхности этих материалов и их прогретых поверхностных слоев до температуры ниже температуры начала выхода горючих летучих фракций или начала их пиролиза.
- Процесс тушения представим таким образом, что на всю поверхность ТГМ равномерно наносится слой воды заданной толщины за достаточно короткий промежуток времени практически одновременно. А полное время тушения примем условно равным 10 с, что практически вполне осуществимо и хорошо подтверждается экспериментально в лабораторных условиях.
- Предположим также, что нанесенный слой воды требуемой толщины не стекает с контролируемой поверхности (т.е. что вся поданная вода полностью участвует в процессе тушения).

- Тогда задача сводится к определению (расчету) требуемой толщины слоя воды на поверхности ТГМ 5В, необходимой для полного прекращения процесса горения. Для выбора схемы расчета рассмотрим некоторые основные механизмы прекращения горения при подаче воды на поверхность горящего материала. Как и в предшествующих случаях, пренебрежём: охлаждающим действием воды на зону пламени (на зону протекания химических реакций горения); экранирующим воздействием слоя воды на поверхности ТГМ, который в течение какого-то времени будет находиться на ней и защищать ее от лучистого и конвективного тепловых потоков зоны горения; изолирующим эффектом воды, который она будет оказывать в течение какого-то промежутка времени, впитываясь в поверхностный слой горючего материала до момента ее полного испарения и некоторыми др.

- Остановимся лишь на доминирующем механизме – механизме прекращения горения охлаждением поверхностного слоя горящего материала водой, т.е. за счет нагревания ее до температуры кипения и ее испарения. Для простоты наложения не будем принимать в расчет даже разбавляющий эффект паров воды в зоне пламенных реакций горения и охлаждающий эффект паров воды.
- Задавшись такой моделью процесса горения и такой схемой тушения, можно приближенно рассчитать количество воды, необходимое для прекращения горения охлаждением ТГМ. Предположим, что горение прекратится в тот момент, когда температура верхнего, прогретого слоя горючего материала снизится ниже температуры выхода горючих летучих фракций. Тогда горючая смесь в зоне горения над поверхностью горящего образца обеднится, интенсивность тепловыделения уменьшится, температура во фронте пламени снизится до температуры потухания и горение прекратится. При этом прекратится не только пламенное, гомогенное горение, но и гетерогенное беспламенное горение ТГМ и поверхностного углеродного слоя.

- Для определения требуемого количества воды на тушение ТГМ по механизму прекращения горения охлаждением составим баланс тепла на поверхности горящего материала

$$Q_{отв}^в = \sum Q_{отв}^{др}$$

- Количество, тепла, выделяющееся в прогретом слое и аккумулированное в поверхностном слое, можно подсчитать по уравнению:

$$Q_{отв} = Q_{ТГМ} + Q_{Пир} + Q_{ПЛ} , \text{ где}$$

- $Q_{отв}$ - общее количество тепла, которое следует отвести от ТГМ для прекращения процесса пламенного горения летучих над поверхностью образца и гетерогенного горения в прогретом слое; $Q_{ТГМ}$ - количество тепла, запасенное в слое ТГМ, прогретом до температуры выше температуры выхода горючих; $Q_{Пир}$ - теплота экзотермических процессов пиролиза в указанном диапазоне температур за время тушения; $Q_{ПЛ}$ - количество тепла, поступающее к поверхности горючего материала от пламени из зоны горения за время тушения.

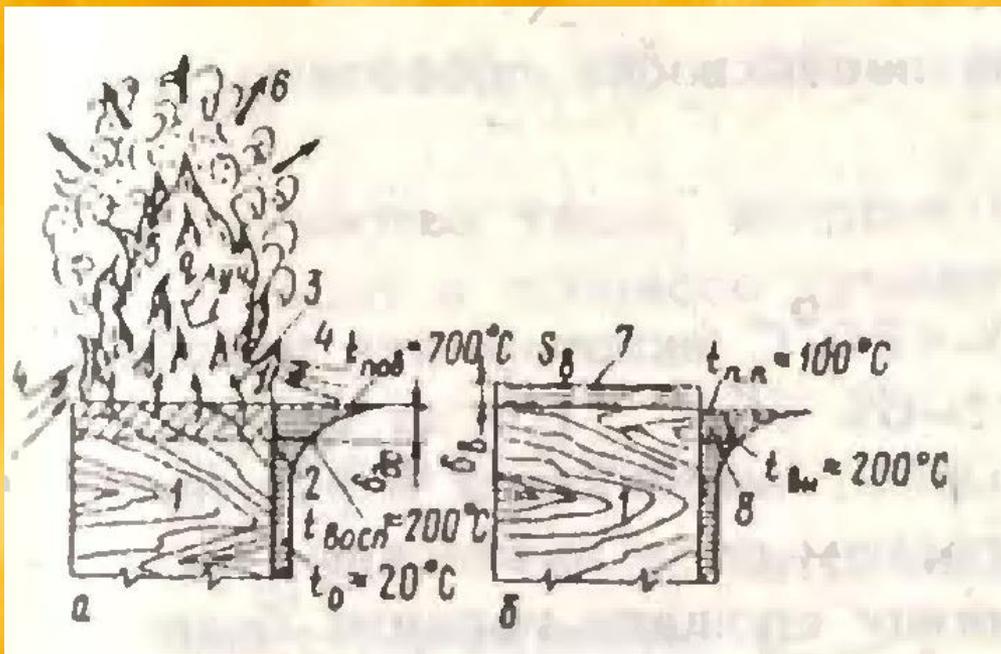


Схема процесса горения (а) и тушения пламени (б) над горизонтальной поверхностью твердого горючего материала:

- 1 - твердый горючий материал (древесина);
- 2 - толщина слоя, прогретого выше температуры начала пиролиза ($\delta_{др}$);
- 3 - выход летучих (смеси горючих газов);
- 4 - подсос воздуха в зону горения;
- 5 - факел пламени; 6 - продукты сгорания;
- 7 - условная толщина слоя воды, необходимой для тушения ($\delta_{в}$); 8 – эпюра поля температур в древесине в момент тушения.

- Для расчета количества воды, требуемой для тушения пожара ТГМ по механизму прекращения горения охлаждением, в качестве горючего материала примем древесину. Тогда за температуру выхода горючих летучих фракций примем условно температуру начала пиролиза древесины 200 С. Максимальную температуру на поверхности горящей древесины - 700°С. Толщина прогретого слоя древесины $\delta_{др}$ до температуры выше 200°С для термически толстых образцов составляет 1 см.

- Предположим, что температура в прогретом слое древесины изменяется по линейному закону, от $t_{нач}$ на поверхности горения до t_{max} в глубине образца. Удельную плотность абсолютно сухой, частично пиролизованной древесины и ее теплоемкость определим по таблицам, соответственно равными:
- $\rho_{др} \sim 300 \text{ кг/м}^3$; $C_{др} \sim 1,47 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)}$
- Тогда количество тепла, запасенное в древесине, которое следует отвести от нее для прекращения процессов горения, определим по выражению:

$$Q_{др} = m_{др} C_{др} \Delta t_{др} = V_{др} \rho_{др} C_{др} \frac{t_{др}^{max} - t_{нач}^{пир}}{2} ;$$

$$Q_{др} = S_{др} \delta_{др} \rho_{др} C_{др} \frac{t_{др}^{max} - t_{нач}^{пир}}{2}$$

- После подстановки численных значений входящих величин получим:

$$Q_{др} = S_{др} 0.01 * 300 * 1.47 \frac{700 - 200}{2} = 1100 S_{др}$$

- Или, в расчете на 1 м² горящей поверхности древесины
- $Q_{др} \approx 1100$ кДж/м².
- В диапазоне температур 350-450°С экзотермика пиролиза древесины составляет величину 5-6% Q_H^P .
- Тогда наибольшее количество тепла, которое может выделиться в результате пиролитических процессов в прогретом слое древесины, за время ее тушения в расчете на единицу площади горения будет равно:

$$Q_{пир} = 0,5 m_1 0,06 Q_H^P r_T$$

- где m_1 - удельная массовая скорость выгорания древесины.

- Допустим, что удельная массовая скорость пиролиза (в расчете на 1 м² поверхности горения) равна массовой скорости выгорания древесины. А скорость выгорания за время тушения изменяется от своего наибольшего значения до нуля. Согласно многочисленным экспериментальным данным, удельная массовая скорость выгорания древесины на развитом пожаре $m_1 \sim 0,01$ кг/(м² * с). Как известно, древесины $Q_H \sim 16800$ кДж/кг, тогда после подстановки численных значений входящих величин получим:

$$Q_{\text{туп}} = 0,5 * 0,01 * 0,06 * 16800 * 10 = 50$$

- Известно, что одиночный деревянный образец не горит с горизонтальной поверхности без внешнего дополнительного радиационного теплового потока. Экспериментально установлено, что количество тепла, поступающего от факела пламени к поверхности древесины, составляет величину 6% Q_{Π} , где $Q_{\Pi} = \beta m_1 F_{\Pi} Q_H^P$,

$$Q_{\text{луч}} = 0,06 \beta m_1 S_{\text{др}} Q_H^P r_T = 0,06 * 0,9 * 0,01 * 16800 * 10 S_{\text{др}} \approx 91 S_{\text{др}} \quad \text{или}$$

в расчете на 1 м² поверхности горения $Q_{\text{луч}} = 91$ (кДж/м²).

Тогда суммарное количество тепла, которое следует отвести от древесины, для её тушения по механизму прекращения

$$\text{горения охлаждением} \quad Q_{\text{отв}} = Q_{\text{др}} + Q_{\text{ПИР}} + Q_{\text{ПЛ}}$$

в расчете на 1 м² поверхности горения будет равно:

$$Q_{\text{отв}} = 1100 + 50 + 91 = 1240 \quad \text{кДж/м}^2.$$

- Количество тепла, которое будет отведено от горящего образца водой в процессе тушения, определим по формуле

$$Q_B = Q_{H.B} + Q_{ПИР} + Q_{ИСП.В}$$

- где $Q_{H.B}$ - тепло, затрачиваемое на нагревание воды до температуры кипения;
- $Q_{ИСП.В}$ - тепло, затрачиваемое на испарение воды.

$$Q_{H.B} = m_B C_B \Delta t_B = S_B \delta_B \rho_B C_B \Delta t_B$$

$$Q_{ИСП.В} = m_B r_B = S_B \delta_B \rho_B r_B$$

- где r_B - скрытая теплота парообразования воды (2270 кДж/кг). Для полного прекращения горения древесины должно выполняться условие $Q_B < Q_{отв}$ и,
- подставив выражения для $Q_{ИСП.В}$ и $Q_{H.B}$, получим:

$$Q_{отв} \leq S_B \delta_B \rho_B (C_B \Delta t_B + r_B)$$

- Учитывая, что согласно принятым ранее условиям, вода не_{SEP}стекает с горячей поверхности древесины и равномерным слоем_{SEP}лежит на ней, т.е. что $S_B \sim S_{др}$, сократим эти члены и решим последнее уравнение относительно δ :

$$\delta_B \geq \frac{1240 \cdot 10^{-2}}{\rho_B (C_B \Delta t_B + r_B)}$$

- Приняв начальную температуру воды $t_H = 20^\circ\text{C}$, после подстановки получим: $\delta_B \geq \frac{1240 \cdot 10^{-2}}{2616} = \frac{1240}{2616} \approx 0.00475$

- $\delta_B \approx 0.5$ ДМ.
- или окончательно: мм,
- т.е. требуемая расчетная толщина слоя воды, необходимая для тушения древесины, равна 0,5 мм.

- А критический удельный расход воды будет равен:

- $$q_{уд} = \frac{V_B}{S} = \frac{\delta_B S_B}{S_{др}} = \frac{\delta_B S_{др}}{S_{др}} = \frac{0.005 * 100}{S_{др}} = 0.5 \quad \text{дм}^3/\text{м}^2.$$

- или $q_{уд} = 0,5 \text{ л}/\text{м}^2.$

- где $S_{др}$ - площадь тушения, равная $1 \text{ м}^2.$

- Однако столь малыми удельными расходами воды можно потушить пожар только при двух принятых ранее условиях: горящая поверхность расположена горизонтально; размеры поверхности относительно невелики.

- На реальных пожарах древесина охлаждается не до температуры начала ее пиролиза, а до температуры воды, применяемой для тушения пожара. Это приводит к незначительному увеличению удельного расхода воды, до $q_{\text{вуд}} > 0,7 \text{ л/м}^2$. Кроме того, вода подается до полного насыщения горючего материала водой. Это еще в 2-3 раза увеличивает удельный расход воды на тушение реального пожара, доводя $q_{\text{вуд}}$ до 2-2,5 л/м². Но при этом резко возрастает надежность процесса тушения и исключается опасность повторного воспламенения. Наконец, на реальных пожарах удельный расход воды возрастает (в расчете на единицу площади пожара) пропорционально величине коэффициента поверхности горения КП. Так как на реальных пожарах КП ~ 1,5-2, то удельный расход воды на тушение пожара возрастает до 4-5 л/м². Но тем не менее, с помощью этой величины можно рассчитать теоретически необходимый удельный расход воды на тушение реальных пожаров.

- Очевидно, что практический расход воды на тушение зависит от условий боевой обстановки, размеров площади пожара и ряда других осложняющих факторов.
- Но как показывает анализ статистических данных, величина удельного расхода воды на наиболее удачно потушенных пожарах вполне удовлетворительно описывается уравнением вида $q_{\text{вуд}} = f(F_{\text{П}})$, которое для простейших пожаров в одноэтажных каменных зданиях I и II степени огнестойкости может быть записано в следующем виде: $\left[\begin{array}{c} I \\ \text{SEP} \end{array} \right]$
- $q_{\text{вуд}} = 0,5 F_{\text{П}}$,
- где $F_{\text{П}}$ - площадь пожара, м².

**СПАСИБО
за внимание**

