

**С.С. Воевода, С.А. Макаров, В.П. Молчанов, Б.Ж. Битуев,
Д.Л. Бастриков, М.А. Крутов**

(Академия Государственной противопожарной службы МЧС России;
e-mail: dlbastrikov@mail.ru)

ОБЪЁМНОЕ ТУШЕНИЕ ЗАКРЫТЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ВЫСОКОКРАТНОЙ ПЕНОЙ

Проведён анализ результатов натурных испытаний заполнения закрытых производственных объектов высокократной пеной, представлена разработанная математическая модель для расчётов основных параметров тушения, предложена лабораторная установка для определения пенообразующей способности пенообразователей и капиллярного давления в пенных каналах.

Ключевые слова: пенообразователь, контактное разрушение, пена высокой кратности, топливо.

**S.S. Voevoda, S.A. Makarov, V.P. Molchanov, B.G. Bituev,
D.L. Bostrikov, M.A. Krutov**

VOLUMINAL EXTINGUISHING OF SECRET PROCESS FACILITIES BY HIGH-EXPANSION FOAM

Analysed results of actual testing of secret facilities filling by high-extension foam, developed mathematical model for calculation of main extinguishing parameters, laboratory unit for determination of foaming agent foaming capacity and capillary pressure in foam canals.

Key word: foam former, contact destruction, foam high frequency rate, fuel.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 4 марта 2011 г.

Натурные испытания проводились на модели насосной по перекачке нефти и нефтепродуктов. Образование пены происходило на пеногенераторах без принудительного наддува воздуха. Рабочая поверхность пеногенератора обладала низким гидравлическим сопротивлением, так как вместо сеток на генераторах были установлены перфорированные металлические пластины. Высота расположения пеногенераторов составляла 4,8 м, площадь помещения – 450 м². Тушение пожара предусматривало заполнение пеной помещения насосной на 2,0-2,5 м. Максимальная высота пенного слоя 7,8 м. Число пеногенераторов варьировалось от 2 до 6. Образование пены происходило в задымленном помещении и в помещении с чистым воздухом (рис. 1).

Кратность пены определяли устройством, работающем на принципе сравнения электропроводности рабочего раствора ПАВ и электропроводности полученной пены. Капиллярное давление в пенных каналах определяли компенсационным методом [1, 2].

В работе использовали различные пенообразующие составы как отечественного, так и зарубежного производства с условным наименованием: УП-SO, ПО-PL, ПО-HF, ПО-ZT, ПО-TS, УП-NO.

Экспериментальные исследования показали, что время тушения помещения насосной по перекачке нефтепродуктов пеной кратностью 700, при условии заполнения на высоту 2,5 м, составило 160 с.

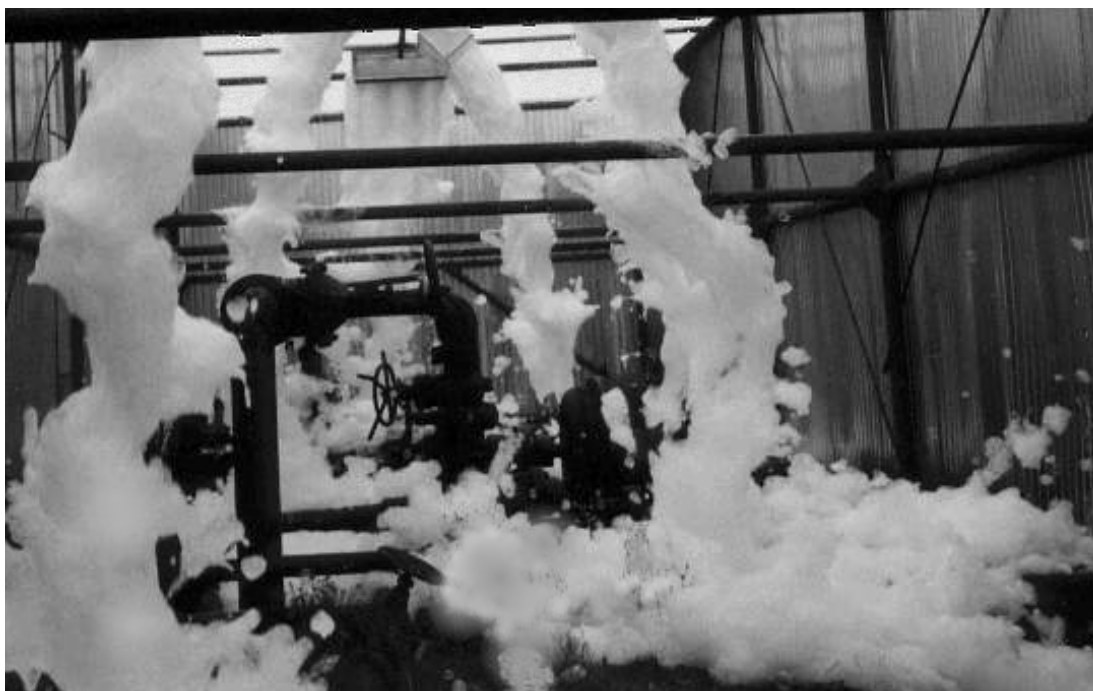


Рис. 1. Заполнение насосной высококократной пеной

Анализ процесса тушения помещения насосной показал, что скорость заполнения пеной помещения постепенно снижается по мере увеличения высоты пенного слоя. Чем больше высота пенного слоя, тем выше скорость разрушения пены.

Разработано уравнение материального баланса пены, поданной в задымленное помещение. Разрушение пены происходит во всем объеме пенного слоя от воздействия дыма, находящегося в пузырьках пены, а также в поверхностном слое от воздействия гидростатического давления:

$$q \, d\tau = U_s \cdot S_f \cdot d\tau + U_h \cdot S_0 \cdot d\tau + S_0 \cdot dh, \quad (1)$$

где q – секундный расход пены, m^3/c ;

U_s – скорость разрушения пены от воздействия дыма, m/c ;

S_f – общая площадь поверхности пены, m^2 ;

U_h – скорость разрушения пены в поверхностном слое, m/c ;

S_0 – площадь помещения, m^2 ;

h – средняя высота слоя пены, m .

Так как

$$U_h = \beta h, \quad (2)$$

где β – коэффициент пропорциональности, а S_f равно

$$S_f = 4\pi r^2 \cdot n_{\text{пузырьков}} = 4\pi r^2 \cdot \frac{V_{\text{пены}}}{\frac{4}{3}\pi r^3} = \frac{3V_{\text{пены}}}{r_{\text{пузырька}}}, \quad (3)$$

уравнение (1) примет следующий вид:

$$q \, d\tau = U_s \cdot \frac{3V_{\text{пены}}}{r} \cdot d\tau + \beta \cdot h \cdot S_0 \cdot d\tau + S_0 \cdot dh. \quad (4)$$

Преобразуя уравнение (4), получим:

$$d\tau = \frac{S_0}{q - U_s \cdot \frac{3V_{пены}}{r} - \beta \cdot h \cdot S_0} dh, \quad (5)$$

а так как $V_{пены}$ равен $S_0 \cdot h$, получим:

$$d\tau = \frac{S_0}{q - \left(U_s \frac{3}{r} + \beta \right) S_0 \cdot h} dh. \quad (7)$$

Проинтегрировав дифференциальное уравнение (7) в начальных условиях $\tau = 0, h = 0$, получим:

$$\tau = \frac{1}{U_s \frac{3}{r} + \beta} \cdot \ln \left(1 - \frac{\left(U_s \frac{3}{r} + \beta \right) \cdot S_0 \cdot h}{q} \right), \quad (8)$$

где τ – время тушения.

Из выражения (8) путём преобразований можно найти зависимость степени заполнения помещения от времени.

Численное значение коэффициента β определяется предельным значением капиллярного давления, которое пена способна выдерживать. Величина предельного капиллярного давления пенных каналов определяется природой пенообразователя и структурой пены.

На рис. 2 показана зависимость изменения капиллярного давления в пенных каналах с течением времени. Измерения производились в соответствии с методиками, описанными в [2, 3, 4]. Чем выше значение предельного капиллярного давления, которое может выдерживать пена, тем лучше её устойчивость и меньше скорость разрушения пенного слоя.

Численное значение коэффициента β равно:

$$\beta = \frac{U_{\Delta P}}{\Delta P_{\sigma \max}}, \quad (10)$$

где $U_{\Delta P}$ – скорость роста капиллярного давления в пенных каналах, $kПа/с$;

$\Delta P_{\sigma \max}$ – предельное значение капиллярного давления, $kПа$.

Анализируя графики на рис. 2-3, можно сделать вывод о том, на каком пенообразователе полученная пена будет наиболее устойчивой.

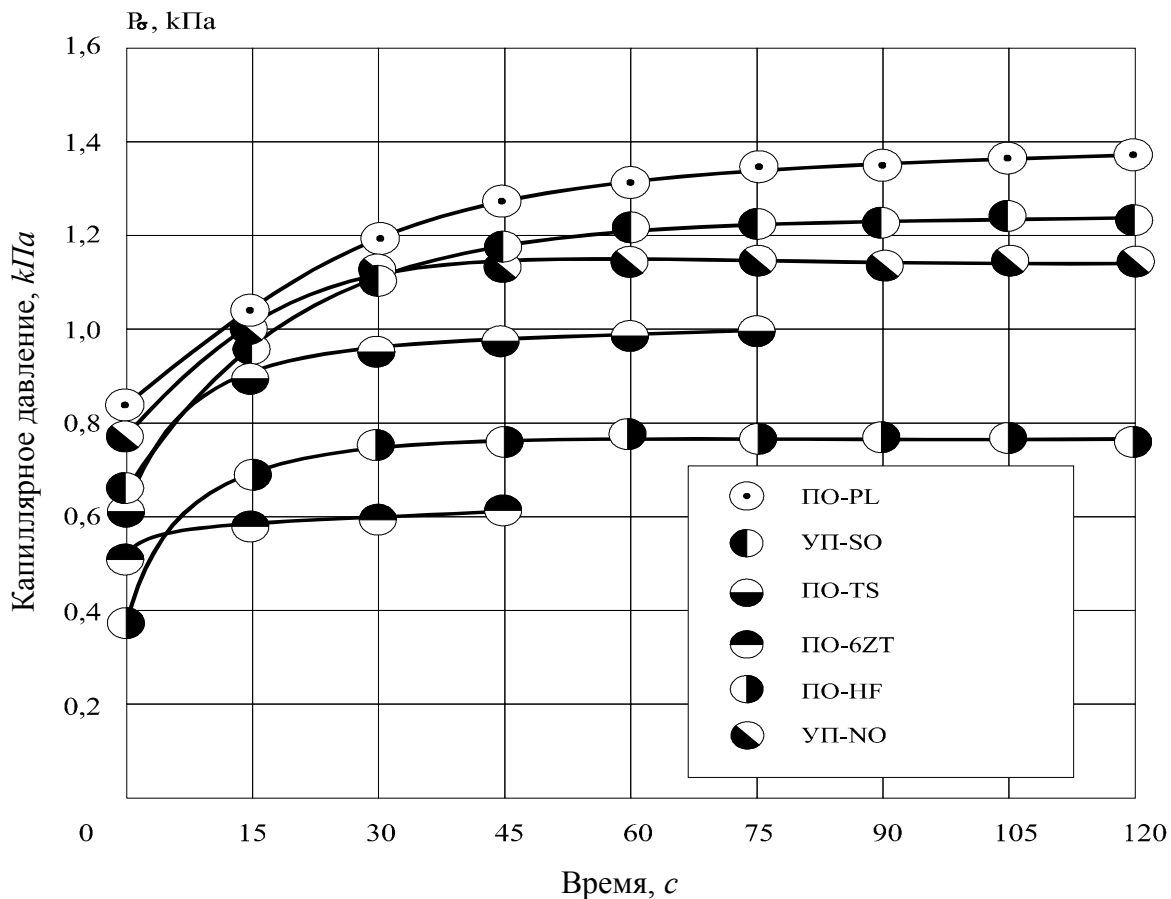


Рис. 2. Изменение величины капиллярного давления в пенных каналах с течением времени

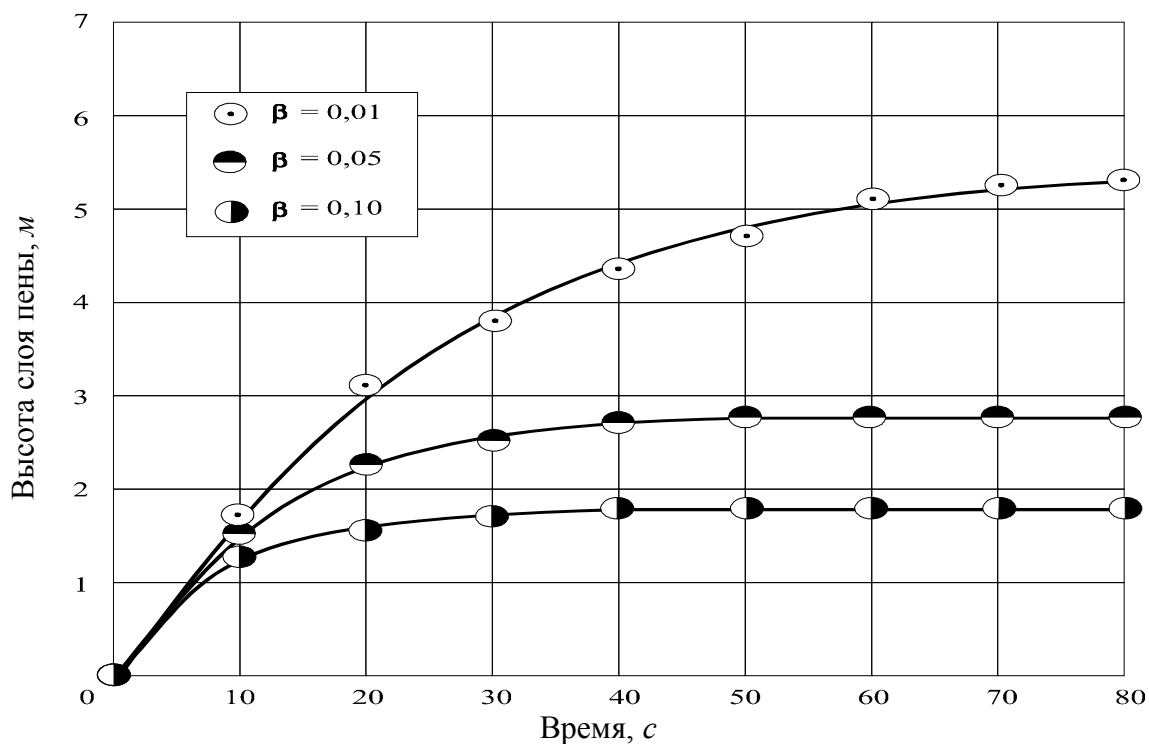


Рис. 3. Зависимость степени заполнения задымленного помещения высокократной пеной от времени заполнения при различной величине коэффициента β

В связи с тем, что высокократная пена получается с использованием задымленного воздуха, содержащего смолистую дисперсию и другие вещества, способствующие её разрушению, требовалось экспериментальным путем установить влияние дыма на образование пенного слоя. Результаты экспериментальных исследований (рис. 4) свидетельствуют о существенной роли продуктов горения в образовании и существовании пены.

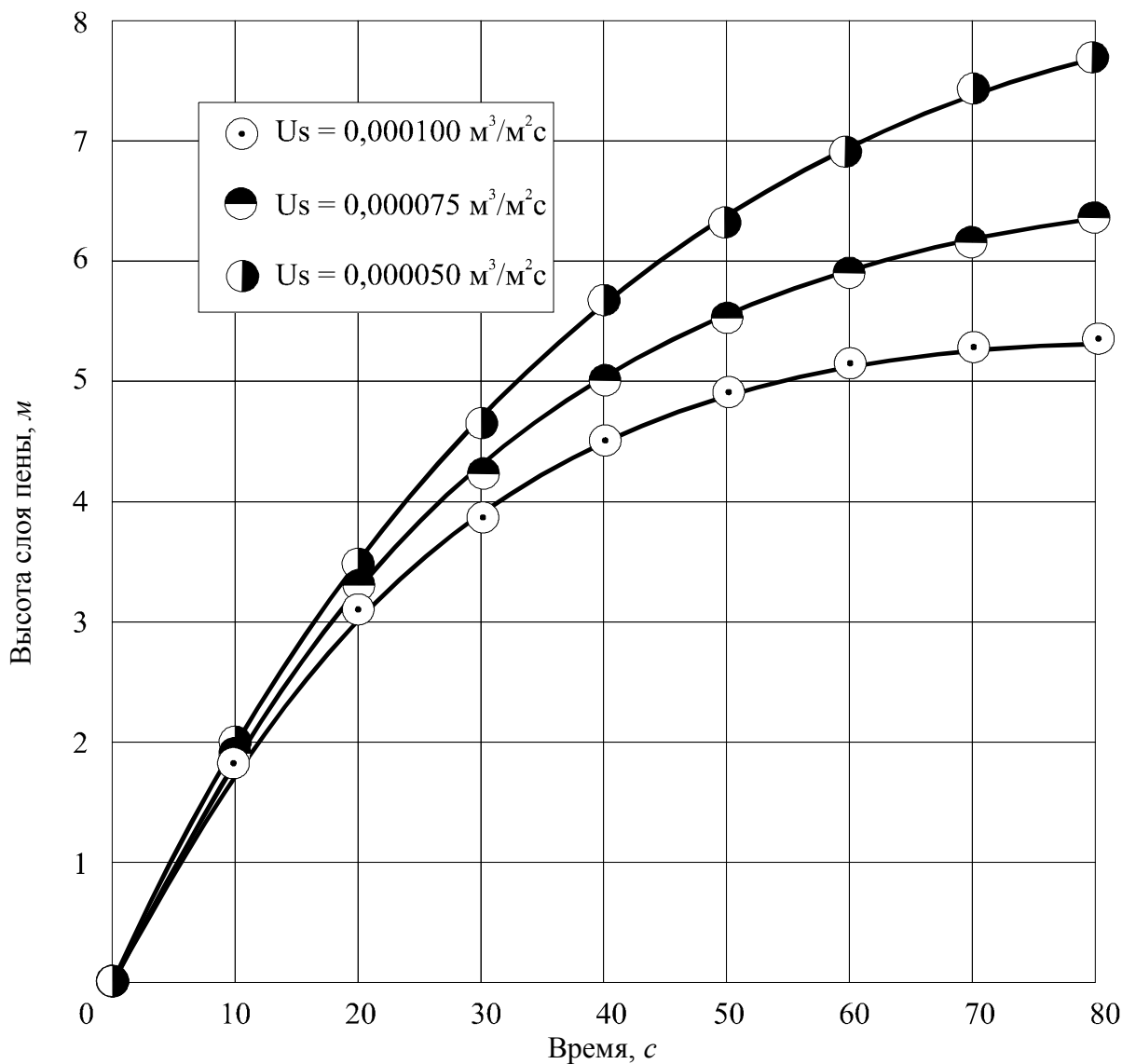


Рис. 4. Зависимость степени заполнения помещения высокократной пеной от времени заполнения при различной скорости разрушения пены от воздействия дыма

Для проведения исследований пен с заданной структурой в лабораторных условиях использована установка, схема которой представлена на рис. 5. Данный метод основан на изменении условий процесса пенообразования при стабильных расходах воздуха и раствора. Расход воздуха фиксируется при помощи ротаметров, контролирующих расход воздуха, поступающего в пеногенератор, и отведенного из пеногенератора избытка. Этим достигается независимость показателей процесса пенообразования от плотности орошения пакета сеток и возможность изучения влияния на эти параметры природы и концентрации поверхностно-активных веществ [5, 7].

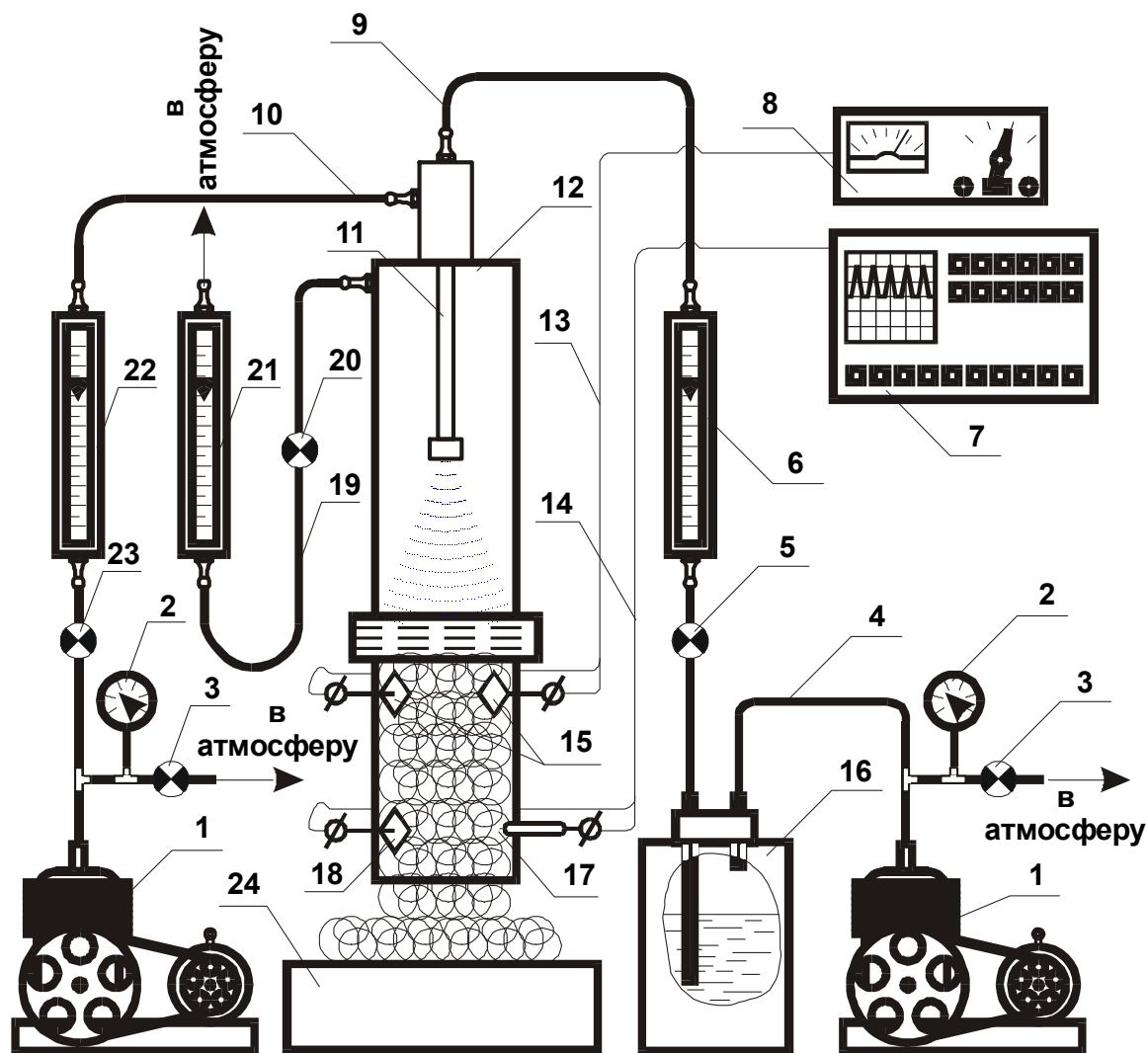


Рис. 5. Схема установки для получения высокократных пен в лабораторных условиях

Установка состоит из компрессоров 1, выносных манометров 2, вентилей 3 регулировки давления в магистралях, магистрали 4 подачи воздуха в вытеснительную ёмкость с испытуемым раствором, регулировочного вентиля 5, дозирующего расход раствора на пенообразование, жидкостного ротаметра 6, запоминающего осциллографа 7 (тип С8-13), автоматического измерителя кратности пены 8 (тип ИКРАП), магистрали подачи раствора 9 в пеногенератор, магистрали подачи воздуха 10 в пеногенератор, распылителя 11, корпуса пеногенератора 12, соединительной электрической линии 13 прибора ИКРАП, соединительной электрической линии 14 осциллографа С8-13, контактов 15 автоматического измерителя кратности пены ИКРАП, вытеснительной ёмкости 16 с испытуемым раствором ПАВ (пенообразователя), золотого игольчатого контакта 17 осциллографа С8-13, второго контакта 18 осциллографа, линии отвода избыточного воздуха 19 от сеток пеногенератора, вентиля 20, регулирующего расход отводимого воздуха, ротаметра 21 контроля расхода отводимого воздуха, ротаметра 22 контроля расхода поступающего на пенообразование воздуха, вентиля 23, регулирующего расход воздуха идущего на пенообразование, утилизатора пены 24.

Исследование количественных характеристик процесса пенообразования по максимальной кратности пены K_m , критической скорости воздушного потока V_k и коэффициенту использования воздуха B , проводили при расходе рабочего раствора ПАВ, равном $0,03 \text{ см}^3/\text{с}$ и плотности орошения пакета сеток $0,054 \text{ кг}/\text{м}^2\text{с}$.

Коэффициент использования воздуха B определяли из соотношения (1), основываясь на результатах показаний измеренной максимальной кратности пены K_m и показаний жидкостного и воздушного ротаметров [1, 2]:

$$B = K_M \frac{V_p}{V_в}; \quad (11)$$

где K_m – максимальная полученная кратность пены;

V_p – расход раствора в опыте;

$V_в$ – расход воздуха в опыте.

Относительная погрешность определения величины составляла $\pm 6 \%$ по ротаметру, а определение значений кратности пены осуществлялось устройством ИКРАП с относительной погрешностью измерений $\pm 5 \%$. В качестве объектов испытаний были взяты углеводородные поверхностно-активные вещества.

В табл. 1 представлены результаты экспериментальных исследований пенообразующей способности образца Sodiumoctylsulphate (42 %-го концентрата первичных алкилсульфатов натрия $C_{12}-C_{14}$).

Таблица 1

Наименование испытуемого образца	Параметры процесса	Концентрация испытуемого вещества в растворе % (масс)						
		1	2	3	4	5	6	7
Sodiumoctylsulphate	K_m	110	325	400	460	600	730	950
	$V_k (\text{м}/\text{с})$	0,60	0,69	0,72	0,90	1,38	1,520	1,71
	B	0,58	0,67	0,82	0,91	0,93	94	0,95

Учитывая представления о формировании пузырьков пены [4-8], механизм пенообразования на сетках следует рассматривать как процесс обращения двухфазного потока типа дым-жидкость, осуществляющий через формирование смачивающей плёнки смену дисперсионной газовой среды на жидкостную с образованием пенных пленок, каналов пены и гидродинамических связей между ними.

Обращение фаз и законченность структуры пены на выходе пеногенератора коренным образом отличает пенообразование на сетках от других известных способов получения пен, при которых достижение высокой кратности возможно только в результате синерезиса.

Модель пенообразования можно представить в виде саморегулирующейся дисперсной системы, устойчивое формирование структуры которой обусловлено сохранением сплошности смачивавшей плёнки по всей поверхности сетки независимо от режима работы пеногенератора. Процесс пенообразования сопровождается перераспределением жидкости в смачивающей и пенных плён-

ках, обусловленным гидродинамическими течениями, возникающими в результате воздействия газового потока и орошения пенообразующим раствором поверхности смачивающей плёнки.

На рис. 6 показана схема модели пенообразования, представляющая собой непрерывную последовательность стадий (I, II, III, IV) формирования структуры пены на смежных ячейках (A, B, C).

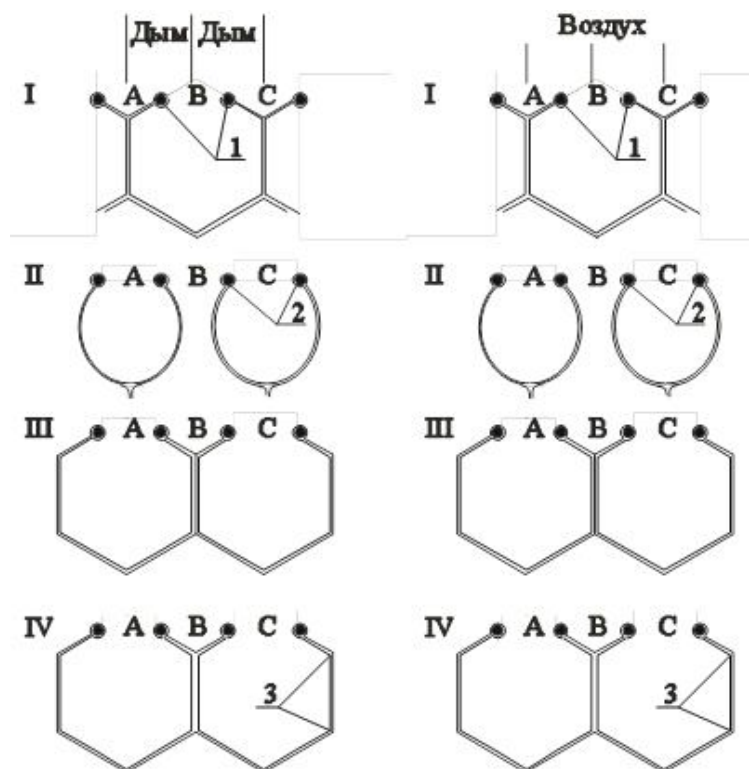


Рис. 6. Этапы формирования структуры высокократной пены:
 I – исходное состояние; II – образование куполообразных оболочек;
 III – формирование локального места контакта оболочек;
 IV – формирование пенных пленок и каналов;
 1 – элементы сетки пеногенератора; 2 – смачивающая плёнка;
 3 – пенные каналы; A, B, C – обозначения ячеек сетки

Исходное состояние системы (стадия I) характеризуется наличием пенных пленок в ячейках A и C, вершины которых соединены с каналами смачивавшей плёнки, а в ячейке B находится пузырек дыма (воздуха), ограниченный плёнками пены в виде многогранника. Под действием набегающего газового потока плёнки, закрывающие ячейки A и C, приобретают форму куполообразных оболочек и расширяясь входят в соприкосновение (стадия II). Дальнейшее нарастание давления в оболочках приводит сначала к формированию пятна контакта между смежными плёнками, разделенными парогазовой прослойкой (стадия III), а затем к их практически мгновенному слиянию и образованию одной общей пенной плёнки (стадия IV), разделяющей смежные пузырьки пены. Таким образом, формирование структуры пен высокой кратности происходит непосредственно около сетки и заканчивается в первых слоях пены. Причем толщина пленок, дисперсность, кратность и радиус кривизны каналов принимают определенные значения уже в третьем-четвертом слое пены.

В начальный момент по периметру пятна контакта пленочных оболочек образуется мениск с бесконечно малым радиусом кривизны. Возникшая в месте слияния гидравлическая связь в сочетании с высоким капиллярным давлением приводит к появлению общей пенной плёнки. Образовавшийся при этом избыток жидкости поступает на подпитку каналов смачивающей плёнки и формирование каналов Плато-Гиббса, кривизна которых определяется скоростью пенообразования и расходом пенообразующего раствора. Чем выше скорость газового потока и меньше расход раствора, тем выше кривизна каналов и кратность пены. Перераспределение жидкости на стадии слияния приводит к выравниванию капиллярных давлений в каналах смачивающей плёнки и каналах пены, радиусы которых принимают стационарные значения. В результате происходит стабилизация структурных параметров пены, вся система возвращается в исходное состояние, а процесс формирования пены начинается снова.

Таким образом, при заполнении помещений высокократной пеной наиболее значимыми параметрами являются кратность пены и капиллярное давление в пенных каналах. Чем выше значение предельного капиллярного давления, которое может выдерживать пена, тем лучше её устойчивость, в этом случае заполнение помещения происходит быстрее. На указанные параметры существенно влияет природа поверхностно-активных веществ пенообразователей. Анионные пенообразователи выдерживают большее давление, чем неионогенные. Наибольшей устойчивостью к действию гидростатического столба жидкости обладают композиционные пенообразователи, которые содержат добавки жирных спиртов, резко повышающие поверхностную вязкость пленок пены. Выявлено, что дым увеличивает время формирования пенного слоя на 30 %, тем самым происходит рост времени тушения. Предложенная методика позволяет в лабораторных условиях определить основные параметры пенообразователей, используемых для получения высокократной пены, в соответствии с критериями выбора.

Литература

1. **Шароварников А.Ф., Цап В.Н.** Распределение жидкости в каналах и плёнках пен. Коллоидн. ж. 1983, т. 45, № 1. С. 120.
2. **Шароварников А.Ф., Казаков М.В.** Изучение процесса пенообразования в генераторах с принудительной подачей воздуха. // В кн.: Пожарная техника и тушение пожаров. М.: ВНИИПО, 1979. С. 114.
3. **Шароварников А.Ф., Цап В.Н.** Электроосмотический перенос жидкости в пенах. Коллоидн. ж. 1982, т. 44, № 4. С. 754.
4. **Христов Х., Кругляков П.М., Эксерова Д.** Влияние давления в Гиббсовых каналах на устойчивость пен // Тезисы VII Международного конгресса по ПАВ. М.: Внешторгиздат, 1976. С. 64.
5. **Капиллярные** эффекты и гидростатическая устойчивость пен / Перцов А.В., Чернин В.Н., Чистяков Б.Е., Щукин Е.Д. ДАН СССР. 1978. т.238. № 6. с.1395-1398.
6. **Христов Х.И., Эксерова Д.Р., Кругляков П.М.** Время жизни пены при постоянном давлении в каналах Плато-Гиббса как характеристика устойчивости. Коллоидн. ж. 1983, т. 24, № 5. С. 85.
7. **Шароварников А.Ф.** Теоретические основы процесса получения противопожарной пены средней и высокой кратности // Пожаровзрывобезопасность. 1999, т. 8, № 2. С. 41.
8. **Шароварников А.Ф.** Противопожарные пены. Состав, свойства, применение. М.: Знак, 2000.