УДК 614.842.615

Д.А. Корольченко, А.Ф. Шароварников

ФГБОУ ВПО «МГСУ»

ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПЕНЫ ВЫСОКОЙ КРАТНОСТИ, ИСПОЛЪЗУЕМОЙ ПРИ ТУШЕНИИ ПОЖАРОВ В ЗАКРЫТЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

Представлены выявленные в ходе полевых испытаний закономерности тушения пожара в закрытых помещениях высокочратной пеной методом объемного заполнения помещений. Показано, что большое влияние на устойчивость пены к разрушению оказывает состав дисперсной фазы, в частности, дыма. Описан механизм воздействия компонентов дыма на образование высокочратной пены исходя из условия сохранения целостности пленок водного раствора пенообразователя. Дано краткое описание взаимодействия компонентов дыма с пеной. Исследовано влияние концентрации и природы поверхностно-активных веществ, концентрации и природы дыма, а также электрокинетических параметров пены на процесс пенообразования с получением пен заданной структуры и контролем таких параметров, как кратность, дисперсность, толщина пенных пленок, капиллярное давление в каналах Плато — Гиббса. Показано, что применение в качестве стабилизаторов композиций с добавками высших жирных спиртов повышает устойчивость пены, а также, что увеличение кратности пены и дисперсности пенных пузырьков приводит к возрастанию вязкоупругих свойств пены. Проведен анализ материального баланса пены высокой кратности, подаваемой на тушение пожара в закрытом помещении, без учета наличия дыма в нем. Показано, что данная формула включает баланс пены, накопленной и разрушенной под действием пламени и гидростатического давления раствора в пенных каналах.

Ключевые слова: пожаротушение, генераторы пены, высокочратная пена, интенсивность образования, кратность пены, дисперсность, толщина пленок, капиллярное давление, закрытые помещения.

Закономерности тушения пожаров высокочратной пеной в закрытых помещениях методом их объемного заполнения были выявлены в ходе полигонных испытаний натурных моделей. Экспериментальные исследования показали, что большое влияние на устойчивость пены к разрушению оказывает состав дисперсной фазы, в частном случае — дыма. Наличие дыма в воздухе, который увлекается в генератор пены струей распыленного водного раствора пенообразователя, всегда приводит к снижению кратности пены. При этом в зависимости от природы пенообразователя и конструкции генератора пены, а также от концентрации и температуры дыма кратность пены снижается с 800...700 до 400...150.

Основными факторами, стабилизирующими смачивающие металлическую поверхность водные пленки, являются поверхностная активность и электроосмотическое давление, обусловленные существованием электрического заряда на границе *раствор — металл* и *раствор — воздух* [1, 2]. Величина этого заряда зависит от природы и концентрации поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые являются основой пенообразователей [3—5]. Воздействие компонентов дыма отразится на этом параметре либо через концентрацию ПАВ, либо

через степень диссоциации ПАВ, либо через модификацию природы поверхности металлической сетки и т.п. [6, 7]. Исследование влияния концентрации и природы ПАВ, концентрации и природы дыма, а также электрокинетических параметров пены на процесс пенообразования связано с получением пен заданной структуры и контролем таких параметров, как кратность, дисперсность, толщина пенных пленок, капиллярное давление в каналах Плато — Гиббса [8—10].

Полигонные испытания проводились на макете помещения высотой 5 м, площадью 450 м² при высоте расположения генераторов пены 4,8 м [2].

На рис. 1 приведена графическая зависимость высоты заполнения помещения H пеной кратностью 700 от времени подачи пены при различном количестве работающих пеногенераторов.

Разрушение пены происходит во всем объеме пенного слоя от воздействия частиц дыма, находящихся в пузырьках пены, а также в поверхностном слое от воздействия гидростатического давления, развивающегося в пенных каналах. Природа гидростатического давления однозначно связана с высотой пенного столба: за счет оттока водного раствора из верхнего слоя пены в ней повышается капиллярное давление, которое в конце измерений (если столб пены не разрушится) достигает величины, численно равной высоте пенного столба [11, 12].

Методы исследования физических параметров высокочрезмерной пены изложены в [13, 14].

В качестве стабилизаторов пены использовали растворы вторичных алкилсульфатов натрия и композиции с добавками высших жирных спиртов (ВЖС) с длиной углеродной цепи C_{10} — C_{12} . Установлено, что даже небольшие добавки ВЖС приводят к заметному повышению устойчивости пены, поэтому, как правило, проводили сравнительные измерения параметров пен с добавками жирных спиртов [15, 16]. Зависимость капиллярного давления в каналах Плато — Гиббса в верхнем уровне пенного столба от времени для пен, стабилизированных ВЖС различной концентрации, показана на рис. 2.

Измерения показывают, что наблюдаемый «динамический эффект» не связан с изменениями в пене, а обусловлен деформацией пограничного слоя пузырьков, контактирующих с пористым фильтром. Капиллярное давление пенных каналов определяет силу сцепления между отдельными пузырьками. Если пену нанести тонким слоем на поверхность водного раствора, то капиллярное давление в каналах пены резко снизится, и пузырьки быстро отделят-

Рис. 1. Зависимость высоты заполнения помещения высокочрезмерной пеной от времени подачи при работе двух (1), четырех (2) и пяти (3) пеногенераторов

ся друг от друга, меняя полиэдрическую форму на сферическую. Для пен с толстыми пенными пленками можно не учитывать действие сил молекулярного притяжения адсорбционных слоев и расклинивающего давления пленок. В связи с этим можно ожидать, что прочность пены при одноосном растяжении и сдвиге должна определяться величиной капиллярного давления каналов Плато — Гиббса.

Рис. 2. Зависимость капиллярного давления в каналах Плато — Гиббса от времени в пене: 1 — из вторичных алкилсульфатов натрия (ВАН); 2 — ВАН с добавками ВЖС в количестве 0,01 % масс.

Пена является упругопластическим телом, поэтому для ее описания можно использовать закон сдвиговой прочности [17]

$$\tau = \mu(P_N + P_M), \quad (1)$$

где τ — напряжение сдвига в пене; μ — коэффициент внутреннего трения; P_N — сила нормального давления; P_M — равнодействующая сил молекулярного притяжения.

Величину P_M при рассмотрении пены с пленками толщиной менее 1 мкм можно не учитывать. Сила нормального давления на пузырьки пены в отсутствие внешнего перепада давления определяется величиной капиллярного давления [18, 19]. Повышение кратности и дисперсности ведет к однозначному росту прочности пены. При одноосном растяжении цилиндрического образца в нем возникают касательные напряжения, причем максимальное значение касательного напряжения, которое соответствует предельному напряжению сдвига напряжений, реализуется в плоскости, находящейся под углом 45° к направлению растяжения. Величина сдвигового напряжения составляет половину от напряжения в осевом направлении [17], а предельное напряжение сдвига равно половине прочности пены при одноосном растяжении [20], поэтому результаты измерений, представленные на рис. 4, в равной мере относятся и к предельному напряжению сдвига с учетом соотношения между обеими величинами, т.е.

$$\tau = \frac{P_c}{2},$$

где P_c — прочность пены при одноосной деформации, Па.

В условиях деформаций, близких к равновесным, предельное напряжение сдвига τ рассчитывали по формуле

$$\tau_f = \mu \left(P - \frac{1,8\sigma}{r} \right), \quad (2)$$

где σ — поверхностное натяжение раствора, мН/м; r — средний радиус пенных пузырьков, мм.

Формула (2) для «каналовых» пен в предположении, что основная масса жидкости заключена в каналах Плато — Гиббса, примет вид

$$\tau_f = \frac{\mu\sigma}{a} (0,46K^{1/2} - 1,8). \quad (3)$$

Прочность пены, измеренная в диапазоне нагрузок до $0,2 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, оставалась постоянной. В диапазоне скоростей сдвига U от $0,2$ до $0,6 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ наблюдается повышение прочности на $20\ldots 35\%$. Дальнейшее увеличение параметра U на прочность пены P_c не влияет. Причины зависимости величины P_c от U связаны с возникновением динамической компоненты капиллярного давления в пенных каналах. Результаты расчета параметров P_c и τ_f находятся в удовлетворительном согласии с экспериментом. Предельное напряжение сдвига растет с увеличением дисперсности пены, что следует из формулы (3).

Экспериментальные измерения зависимости массы оторвавшейся части пенного столба от площади его сечения показали наличие линейного соотношения между этими параметрами, что позволило определить прочность пены при одноосном растяжении. Установлено, что прочность пены при одноосном растяжении и предельное напряжение сдвига во многом определяются капиллярным давлением в каналах Плато — Гиббса, а характер развития деформации в пене определяется вязкоупругими свойствами системы.

Результаты измерений вязкости η и модуля упругости E пены при одноосной деформации (модуля Юнга) представлены на рис. 5. Увеличение кратности пены и дисперсности пенных пузырьков приводит к возрастанию вязкоупругих показателей пены. Значения модуля упругости достигают 200 Па , а вязкости — $1,5 \text{ Па} \cdot \text{с}$.

Вопрос о вязкости пены является практически важным, поскольку ею определяется давление, необходимое для обеспечения предельной скорости подачи пены по трубопроводу. Пена является типично неньютоновским объектом. Ее вязкость снижается с увеличением скорости сдвига U_r или сдвигового усилия P_s . В зависимости от структуры пены и ее кратности форма кривых $\eta — U_r$ или $\eta — \lg U_r$ меняется, причем пена низкой кратности характеризуется реологическими кривыми (см. рис. 4) с начальным участком высокой вязкости и завершается диапазоном скоростей с низкой, но постоянной вязкостью.

Рис. 4. Влияние скорости сдвига на вязкость пены различной кратности: 1 — 150; 2 — 100; 3 — 50

Рис. 5. Зависимость модуля продольной упругости (а) и вязкости (б) от кратности пены с радиусом пузырьков: 1 — 0,5 мм; 2 — 0,65 мм; 3 — 1,5 мм

Первый участок соответствует течению в зоне обратимых деформаций в пене, а заключительный — вязкости разрушенной структуры.

Приняв, что удельная скорость гидростатического разрушения пены U_h пропорциональна средней высоте пенного слоя h

$$U_h = \beta_h h, \quad (4)$$

запишем уравнение материального баланса пены с учетом того, что определенная часть пены разрушается в поверхностном слое:

$$qd\tau = S_0 dh + S_0 h U_h d\tau, \quad (5)$$

где β_h — размерный коэффициент пропорциональности, зависящий от капиллярного давления в пене, $\text{м}^3 \text{с/кг}$; q — расход пены, кг/с ; S_0 — площадь поверхности пены, м^2 .

Учитывая, что $U_h = \beta_h h$, а $q/S_0 = J$, получаем:

$$Jd\tau = dh + \beta_h h^2 d\tau, \quad (6)$$

где J — интенсивность подачи пены, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Интегрируя дифференциальное уравнение, вытекающее из уравнения (5) в пределах от $\tau = 0$ до $\tau = \tau_\tau$ и от $h = 0$ до $h = H$, получим:

$$\tau_\tau = \frac{1}{\beta_h} \frac{1}{2\sqrt{J/\beta_h}} \ln \frac{\sqrt{J/\beta_h} + H}{\sqrt{J/\beta_h} - H}, \quad (7)$$

где H — высота помещения.

Время $\tau \rightarrow \infty$ при $\sqrt{J/\beta_h} = H$, поэтому критическая интенсивность $J_{\text{кр}}$ определяется из формулы

$$J = H^2 / \beta_h = J_{\text{кр}}. \quad (8)$$

Величина коэффициента β_h связана с предельным значением капиллярного давления, которое способно выдерживать пена.

Формула (7) описывает зависимость времени тушения от интенсивности подачи пены и высоты помещения. Увеличение высоты слоя пены ведет к синхронному повышению гидростатического и капиллярного давления в пенных каналах и разрыву пенных пленок. Чем больше высота пенного слоя, тем выше скорость разрушения пены и тем больше время тушения.

Библиографический список

1. Делахей П. Двойной слой и кинетика электродных процессов / пер. с англ. А.Д. Фрумкина. М. : Мир, 1967. 354 с.
2. Шароварников А.Ф. Противопожарные пены. Состав, свойства, применение. М. : Знак, 2000. 445 с.
3. Адамсон А. Физическая химия поверхностей / пер. с англ. М. : Мир, 1979. 568 с.
4. Семенов П. Течение жидкости в тонких слоях // Журнал технической физики. 1944. Т. 14. № 7—8. С. 427—437.
5. Ребиндер П.А. Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. Коллоидная химия. М. : Наука, 1978. 368 с.
6. Блинов В.И., Худяков Г.Н. Диффузионное горение жидкостей. М. : АН СССР, 1961. 208 с.
7. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. М. : Наука, 1980. 480 с.
8. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М. : Наука, 1973. 847 с.
9. Мак-Адамс В.Х. Теплопередача / пер. с англ. П.Г. Рашковский. Л.-М. : ОНТИ-Энергоиздат, 1936. 440 с.
10. Nash P. Powder and extinguishing system // Fire Prevention. 1977. No. 118. Pp. 17—21.
11. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. М. : Химия, 1976. 232 с.
12. Шрайбер Г., Порст П. Огнетушащие средства. Химико-физические процессы при горении и тушении / пер. с нем. М. : Стройиздат, 1975. 240 с.
13. Шароварников А.Ф., Воевода С.С., Молчанов В.П. Современные средства и способы тушения пожаров нефтепродуктов. М. : Калан, 2000. 420 с.
14. Шароварников А.Ф., Шароварников С.А. Пенообразователи и пены для тушения пожаров. Состав, свойства, применение. М. : Пожнаука, 2005. 335 с.
15. Молчанов В.П., Шароварников С.А. Закономерности тушения пожаров в резервуарах подслонной системой // Информатизация систем безопасности : мат. IV Междунар. конф. ИСБ—95. М. : ВИПТШ МВД РФ, 1995. С. 129—137.
16. Корольченко А.Я., Шароварников С.А. Тушение смесевых топлив фторсодержащими пенообразователями // Информатизация систем безопасности : мат. IV Междунар. конф. — ИСБ—95. М. : ВИПТШ МВД РФ, 1996. С. 14—17.
17. Виноградов Г.В., Малкин А.Я. Реология полимеров. М. : Химия, 1977. 440 с.
18. Шароварников С.А., Корольченко А.Я., Крымов А.В. Обеспечение пожарной безопасности резервуаров со смесевым топливом : матер. науч.-практ. конф. Москва, 3 декабря 1996 г. М. : МИПБ МВД России, 1996. С. 167—170.
19. Грашичев Н.К. Закономерности тушения нефтепродуктов подачей пены в слой горячего : автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М. : ВИПТШ МВД РФ, 1991. 21 с.
20. Exerowa D., Khristov Khr., Penev J. Some techniques for the investigation of foam stability. Foams // Proc. Symp. on Foams / R.J. Ekers (ed.). N-Y.—London : Academic Press, 1976. 109 p.

Поступила в редакцию в январе 2015 г.

Об авторах: **Корольченко Дмитрий Александрович** — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой комплексной безопасности в строительстве, **Московский государственный строительный университет (ФГБОУ ВПО «МГСУ»)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, 8 (495) 287-49-14 вн. 30-66, ICA_kbs@mgsu.ru;

Шароварников Александр Федорович — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, **Московский государственный строительный университет (ФГБОУ ВПО «МГСУ»)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, 8 (495) 287-49-14 вн. 30-66, ICA_kbs@mgsu.ru.

Для цитирования: *Корольченко Д.А., Шароварников А.Ф.* Физические параметры пены высокой кратности, используемой при тушении пожаров в закрытых помещениях // Вестник МГСУ. 2015. № 2. С. 85—92.

D.A. Korolchenko, A.F. Sharovarnikov

PHYSICAL PARAMETERS OF HIGH EXPANSION FOAM USED FOR FIRE SUPPRESSION IN THE ENCLOSED SPACE

During proving ground tests there were revealed regularities of fire suppression in enclosed space by high expansion foam using the method of volumetric filling. It is shown that the structure of a dispersed phase, particularly of smoke, has a great influence on the resistance of foam to destruction. The impact mechanism of smoke components on the formation of high expansion foam basing on the condition of integrity preserving of foam agent water solution films is considered. A short description of the interaction of smoke components with foam is given. The influence of concentration and nature of surface-active substances (SAS), concentration and nature of smoke is investigated, as well as electrokinetic parameters of foam on the foam forming process with receiving the foams of a specified structure and with control of such parameters as frequency rate, dispersion, thickness of foam films, capillary pressure in a Plateau Gibbs channels. The results of proving ground tests are presented. It is shown that application of the compositions with the highest fatty alcohols (HFA) additives as stabilizers of foam leads to increase of its stability. It is also shown that increase of foam expansion rate and dispersion of foamy bubbles leads to increase of viscoelastic properties of foam. The analysis of the material balance of high expansion foam supplied for fire suppression in enclosed premises, without account for smoke existence in it, is carried out. It is shown that the given formula includes the balance of foam accumulated and destroyed under the influence of flame and hydrostatic pressure of a solution in foamy channels.

Key words: fire suppression, foam generators, high expansion foam, intensity of foam formation, foam expansion, dispersion, thickness of foam films, capillary pressure, enclosed space.

References

1. Delahay P. Double Layer and Electrode Kinetics. New York—London—Sidney, A Division of John Wiley & Sons, Inc., 1965, 321 p.
2. Sharovarnikov A.F. *Protivopozharnye peny. Sostav, svoystva, primeneniye* [Fire-Fighting Foams. Structure, Properties, Application]. Moscow, Znack Publ., 2000, 445 p. (In Russian)
3. Adamson A.W., Gast A.P. Physical Chemistry of Surfaces. Wiley-Interscience, 6 edition, 1997, 808 p.
4. Semenov P. Techenie zhidkosti v tonkikh sloyakh [Fluid Flow in Thin Layers]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Technical Physics]. 1944, vol. 14, no. 7—8, pp. 427—437. (In Russian)
5. Rebinder P.A. *Izbrannye trudy. Poverkhnostnye yavleniya v dispersnykh sistemakh. Kolloidnaya khimiya* [Selected Works. Surface Phenomena in Disperse Systems. Colloid Chemistry]. Moscow, Nauka Publ., 1978, 368 p. (In Russian)
6. Blinov V.I., Khudyakov G.N. *Diffuzionnoye gorenie zhidkostey* [Diffusion Burning of Liquids]. Moscow, AN SSSR Publ., 1961, 208 p. (In Russian)
7. Zel'dovich Ya.B., Barenblatt G.I., Librovich V.B., Makhviladze G.M. *Matematicheskaya teoriya goreniya i vzryva* [Mathematical Theory of Burning and Explosion]. Moscow, Nauka Publ., 1980, 480 p. (In Russian)
8. Loytsyanskiy L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of Liquid and Gas]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 847 p. (In Russian)
9. McAdams W. H. Heat Transmission. New York, McGraw-Hill, 3rd edition, 1954, 490 p.

10. Nash P. Powder and Extinguishing System. Fire Prevention. 1977, no. 118, pp. 17—21.
11. Summ B.D., Goryunov Yu.V. *Fiziko-khimicheskie osnovy smachivaniya i rastekaniya* [Physical and Chemical Basis of Wetting and Flowing]. Moscow, Khimiya Publ., 1976, 232 p. (In Russian)
12. Schreiber G., Porst P. *Ognetushashchie sredstva. Khimiko-fizicheskie protsessy pri goreanii i tushenii* [Fire Extinguishing Agents. Chemical and Physical Processes while Burning and Suppression]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1975, 240 p. (In Russian)
13. Sharovarnikov A.F., Voevoda S.S., Molchanov V.P. *Sovremennye sredstva i sposoby tusheniya pozharov nefteproduktov* [Modern Means and Ways of Fire Extinguishing of Oil Products]. Moscow, Kalan Publ., 2000, 420 p. (In Russian)
14. Sharovarnikov A.F., Sharovarnikov S.A. *Penoobrazovateli i peny dlya tusheniya pozharov. Sostav, svoystva, primenenie* [Foam Concentrates and Fire Extinguishing Foams. Structure, Properties, Application]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2005, 335 p. (In Russian)
15. Molchanov V.P., Sharovarnikov S.A. *Zakonomernosti tusheniya pozharov v rezervuarakh podslonnoy sistemoy* [Regularities of Fire Suppression in Tanks by Sublayer System]. *Informatizatsiya sistem bezopasnosti : materialy IV Mezhdunarodnoy konferentsii ISB—95* [Materials of the Fourth International Conference “Informatization of Safety Systems”—ISB-95]. Moscow, VIPTSh MVD RF Publ., 1995, pp. 129—137. (In Russian)
16. Korolchenko A.Ya., Sharovarnikov S.A. *Tushenie smesevykh topliv ftorsoderzhashchimi penoobrazovatelyami penoobrazovatelyami* [Suppression of Composite Fuels by Fluorine-Containing Foam]. *Informatizatsiya sistem bezopasnosti : materialy IV Mezhdunarodnoy konferentsii ISB—95* [Materials of the Fourth International Conference “Informatization of Safety Systems”—ISB-95]. Moscow, VIPTSh MVD RF Publ., 1995, pp. 14—17. (In Russian)
17. Vinogradov G.V., Malkin A.Ya. *Reologiya polimerov* [Rheology of Polymers]. Moscow, Khimiya Publ., 1977, 440 p. (In Russian)
18. Sharovarnikov S.A., Korolchenko A.Ya., Krymov A.V. *Obespechenie pozharoy bezopasnosti rezervuarov so smesevym toplivom : materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Moskva, 3 dekabrya 1996 goda* [Ensuring of Fire Safety of Tanks with Composite Fuels. Materials of Scientific and Practical Conference. Moscow, 3 December, 1996]. Moscow, MIPB MVD Rossii Publ., 1996, pp. 167—170. (In Russian)
19. Grashichev N.K. *Zakonomernosti tusheniya nefteproduktov podachey peny v sloj goryuchego : avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Regularities of Suppression of Oil Products by Supplying Foam in a Fuel Layer. Abstract of the Dissertation of Candidate of Technical Sciences]. Moscow, VIPTSh MVD RF Publ., 1991, 21 p. (In Russian)
20. Exerowa D., Khristov Khr., Penev J. Some Techniques for the Investigation of Foam Stability. *Foams. Proc. Symp. on Foams*. R.J. Ekers (ed.). N-Y.—London, Academic Press, 1976, 109 p.

About the authors: **Korolchenko Dmitriy Aleksandrovich** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, chair, Department of Complex Safety in Construction, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; +7 (495) 287-49-14 (ext. 30-66); ICA_kbs@mgsu.ru;

Sharovarnikov Aleksandr Fedorovich — Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Complex Safety in Construction, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; +7 (495) 287-49-14 (ext. 30-66); ICA_kbs@mgsu.ru.

For citation: Korolchenko D.A., Sharovarnikov A.F. *Fizicheskie parametry peny vysokoy kratnosti, ispol'zuemoy pri tushenii pozharov v zakrytykh pomeshcheniyakh* [Physical Parameters of High Expansion Foam Used for Fire Suppression in the Enclosed Space]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015, no. 2, pp. 85—92. (In Russian)