

КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОПИСАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ОБРАЗОВАНИЯ ВОЗДУШНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ПЕНЫ НИЗКОЙ КРАТНОСТИ ДЛЯ НУЖД ПОЖАРОТУШЕНИЯ

Камлюк А.Н.

Цель. Теоретически оценить влияние различных факторов на генерирование воздушно-механической пены, получаемой в устройствах для пожаротушения. Сравнить полученные данные с результатами экспериментальных исследований.

Методы. В процессе исследований применялись теоретические и эмпирические методы анализа.

Результаты. В результате расчетов получены данные о предельных (минимальной и максимальной) скоростях для потока жидкости, в диапазоне которых обеспечивается генерирование воздушно-механической пены низкой кратности для широкого класса пеногенерирующих устройств. Рассмотрены механизмы генерирования пены на сетках в насадках на пожарные стволы методом выдувания, на поверхности розеток пенных оросителей автоматических систем пожаротушения методом взбивания, а также за счет введения в камеру смешения воздуха.

Область применения исследований. Результаты анализа могут быть применены при разработке пеногенерирующих устройств, а также для определения оптимальных режимов их работы.

Ключевые слова: пена, диаметр пузырька, скорость выдувания пузырьков, скорость взбивания пузырьков, кратность, устойчивость, дисперсность, газосодержание, эжектор, сетка, ороситель.

(Поступила в редакцию 10 июля 2024 г.)

Введение

Воздушно-механическая пена (далее – пена), применяемая для нужд пожаротушения, представляет собой дисперсную систему, состоящую из пузырьков газа, разделенных пленками жидкости. Принципиальная схема получения пены низкой кратности представлена на рисунке 1а. Как видно, минимальное количество компонентов: вода, пенообразователь и воздух. Процентное соотношение на рисунке 1а указано в соответствии с рекомендациями производителей пенообразователей. Последний играет роль стабилизатора, без которого невозможно получение устойчивой пены низкой кратности.

К основным характеристикам пен относятся кратность, устойчивость и дисперсность (рис. 1б). Для нужд пожаротушения главной характеристикой, которую указывают в технических требованиях к пеногенерирующим устройствам, является кратность, поэтому в данной работе будет идти речь в основном о ней. Если кратность пены находится в диапазоне от 4 до 20, то ее называют пеной низкой кратности. Под кратностью понимают отношение объема получаемой пены к объему водного раствора пенообразователя (далее – раствора), из которого она получена. В отношении устойчивости пен различают следующие ее показатели: устойчивость объема (время разрушения 25 % ее первоначального объема), устойчивость к синерезису (время выделения из пены 50 % жидкой фазы), структурная устойчивость (время изменения среднего диаметра пузырька на 25 % от исходной величины) и др. Что же касается дисперсности – это физическая величина, обратно пропорциональная среднему диаметру пузырьков. По дисперсности пены различают: монодисперсные и полидисперсные. Первые можно получить лишь в особых случаях, используя специальные устройства, поэтому в реальных условиях пены оказываются всегда полидисперсными.

На кратность, устойчивость и дисперсность пен существенное влияние оказывают физико-механические свойства раствора, способ смешения фаз, конструкция пеногенерирующего устройства, а также режимы ведения процесса пенообразования. Тем не менее все

указанные характеристики пены связаны между собой и зависят в первую очередь от газосодержания, смачивающей способности раствора и капиллярных явлений (рис. 1б). Под пеногенерирующими в данной работе понимаются устройства, способные генерировать пену, независимо от конструктивных особенностей и способа подачи или получения раствора и воздуха.



Рисунок 1. – Принципиальная схема получения пены низкой кратности (а) и основные ее характеристики (б)

Основная часть

На практике пену генерируют либо на сетках в насадках на пожарные стволы методом выдувания, либо на поверхности розеток пенных оросителей автоматических систем пожаротушения методом взбивания, либо за счет введения в камеру смешения воздуха (рис. 2).

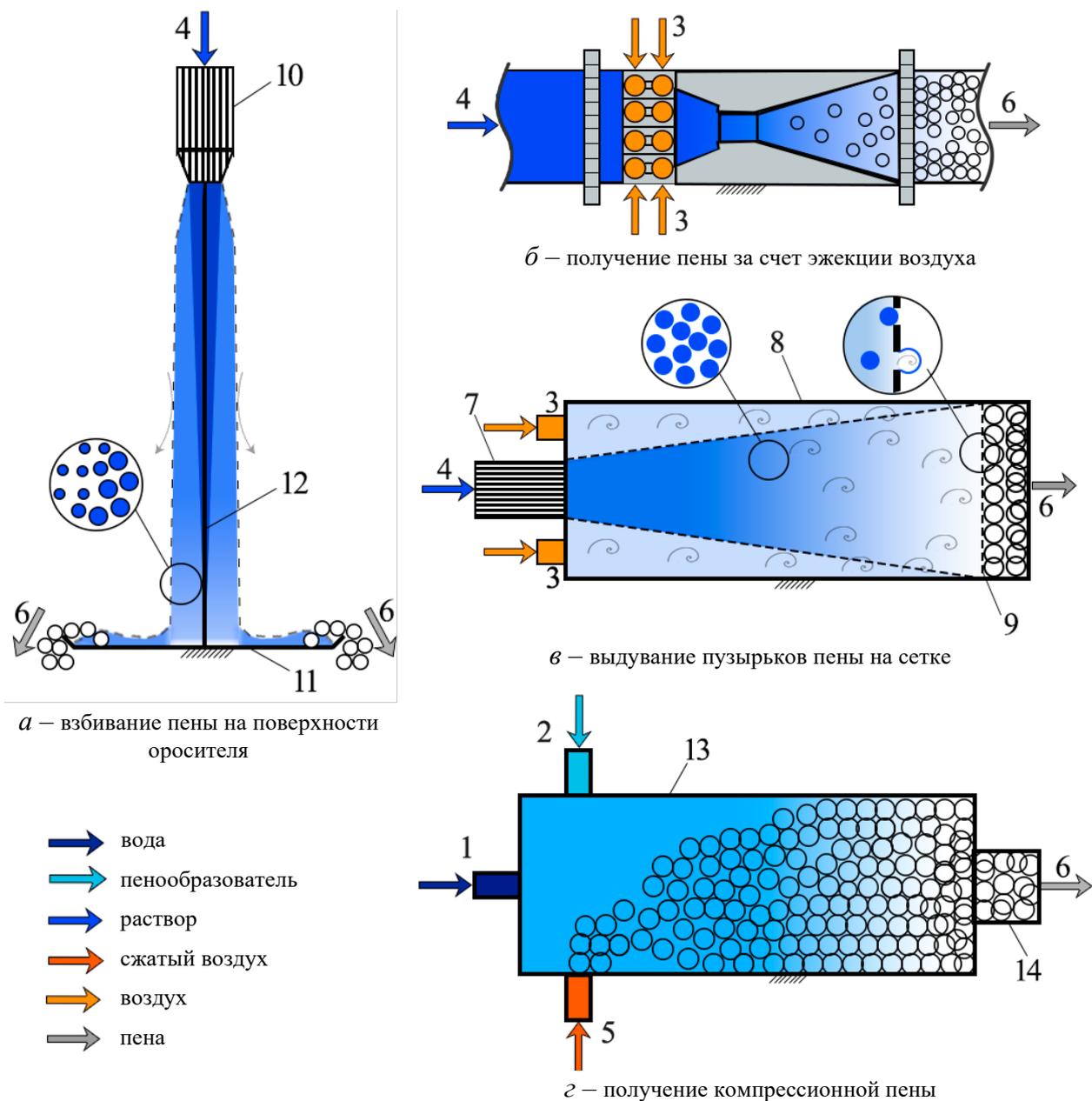
Экспериментально было зафиксировано, что скорость подачи раствора на рабочий орган (сетку или поверхность розетки оросителя) пеногенерирующего устройства оказывает существенное влияние на процесс пенообразования при прочих равных условиях. Так, в случае небольших скоростей вместо пены получается пеноэмульсия, а при достижении скорости некоторого критического значения происходит срыв процесса [1; 2] и, как итог, снова получается пеноэмульсия. Таким образом, процесс пенообразования может протекать только в ограниченном диапазоне скоростей подачи раствора на рабочий орган пеногенерирующего устройства, поэтому его важно знать, чтобы эффективность ликвидации пожара всегда оставалась на высоком уровне.

Причины, по которым нарушается процесс пенообразования, были рассмотрены в обзорной статье И.Ф. Безродного «Забытые имена – забытые знания или... “Почему не тушит пена?..”» [3]. Как считает сам автор, ответ на вопрос, поставленный в названии его работы, является многовариантным:

- 1) первая и основная причина – применяется «неправильный пеногенератор», при разработке которого были допущены ошибки, конструкция которого не прошла полный цикл испытаний, включая огневые, или неверно выбран режим его работы, в результате чего кратность и дисперсность пены ниже требуемых значений;
- 2) при выборе интенсивности (расхода) пены не учтен тепловой режим в зоне пожара. В этом случае для достижения эффекта тушения необходимо увеличить интенсивность;
- 3) если первый и второй варианты учтены, то, возможно, горит не тот продукт, о котором сообщили.

Несмотря на то что подобного рода вопросы регулярно обсуждаются в научных кругах, они остаются актуальными и по сей день. Так, в работе С.Н. Копылова [4] показано, что имеющиеся конструктивные отличия, например в расстоянии от распылителя до сетки или параметрах сетки у пеногенераторов, могут существенно сказываться на качестве генерируемой пены. В статье приведены сравнения результатов экспериментальных исследований по действующему в России стандарту с помощью пеногенераторов, изготовленных по

чертежам Федерального государственного бюджетного учреждения «Всероссийский ордена Знак Почета научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», и генераторов, поступивших в 2013 г. в подразделения Федеральных государственных бюджетных учреждений Федеральной противопожарной службы «Испытательная пожарная лаборатория» в рамках централизованной поставки, которые используются при проведении испытаний пенообразователей по определению одного из главных показателей – «кратность пены». Значения кратности в отдельных случаях оказались отличающимися более чем на 100 %, что недопустимо, т.к. может привести к увеличению времени, требуемого на ликвидацию пожара, и к значительным материальным потерям.



1 – трубопровод для подачи воды; 2 – трубопровод для подачи пенообразователя; 3 – отверстия для эжекции воздуха; 4 – трубопровод для подачи раствора пенообразователя; 5 – трубопровод для подачи сжатого воздуха; 6 – поток пены; 7 – ствол пожарный; 8 – насадок; 9 – металлическая сетка; 10 – штуцер; 11 – розетка; 12 – дужки; 13 – камера смешения; 14 – рукавная линия

Рисунок 2. – Схемы устройств для генерирования пены низкой кратности

Образование пены на поверхности розетки оросителя (рис. 2а). В момент удара струи о поверхность происходит процесс совместного диспергирования раствора и воздуха с образованием пены. Данный процесс протекает при расползании струи в виде пленки, которая затем отрывается.

На участок пленки в форме круга радиусом R и площадью S действуют следующие силы:

F_R – сила реакции поверхности;

σl – силы поверхностного натяжения ($l = 2\pi R$ длина контура, σ – коэффициент поверхностного натяжения);

$p_0 S = \pi p_0 R^2$ – силы атмосферного давления (p_0 – атмосферное давление).

Силой тяжести, действующей на пленку, можно пренебречь ввиду малой толщины пленки.

По третьему закону Ньютона сила реакции поверхности равна силе, с которой струя раствора действует на поверхность. Тогда, если считать, что струя ударяется о поверхность абсолютно упруго, то проекция изменения ее импульса на вертикальную ось:

$$\Delta p = p_1 - (-p_1) = 2p_1 = 2mv = 2Sv\Delta t\rho v = 2S\rho v^2\Delta t, \quad (1)$$

где p_1 – проекция импульса струи на вертикальную ось до удара о поверхность;

$m = Sv\Delta t\rho$ – масса струи раствора с объемом $Sv\Delta t$ и плотностью ρ , прошедшей через поверхность площадью S за время Δt ;

v – скорость струи в момент удара.

С другой стороны, по второму закону Ньютона изменение импульса струи равно импульсу силы:

$$\Delta p = F_R \Delta t. \quad (2)$$

Сравнивая выражения (1) и (2), для абсолютно упругого удара получаем $F_R = 2S\rho v^2$.

В момент отрыва пленки с образованием пузырька можно записать:

$$F_R = p_0 S + \sigma l$$

или

$$2S\rho v^2 = \pi p_0 R^2 + 2\pi\sigma R. \quad (3)$$

Уравнение (3) представляет собой уравнение равновесия пленки раствора на горизонтальной поверхности. Из (3) можно получить выражение для расчета минимальной скорости удара раствора о поверхность, необходимой для отрыва пленки и образования пузырька с радиусом R :

$$v_{\min} = \sqrt{\frac{p_0}{2\rho} + \frac{\sigma}{R\rho}}. \quad (4)$$

Если принять в рассмотрение вариант, когда отрыв пленки происходит после некоторого растекания вертикальной струи по горизонтальной поверхности, то проекция изменения ее импульса на вертикальную ось:

$$\Delta p = p_1 = S\rho v^2\Delta t,$$

и сила реакции будет определяться по формуле $F_R = S\rho v^2$, а выражение для определения скорости примет вид:

$$v_{\min} = \sqrt{\frac{p_0}{\rho} + \frac{\sigma}{R\rho}}. \quad (5)$$

Теперь необходимо получить выражение для определения максимальной скорости струи раствора, при превышении которой может произойти срыв процесса пенообразования. Теоретически основные физические параметры процесса соударения струи суспензии с преградой рассмотрены В.И. Ковалевым и соавторами в работе [5]. При исследовании соударения струи суспензии с преградой ими получены аналитические зависимости для количественной оценки величины минимальной скорости струи ($v = \sigma/\eta$), при которой может происходить разрушение материала, находящегося при контакте струи суспензии с преградой. В этом случае струя приобретает свойства твердого тела, не подверженного деформации. Если скорость струи достигает значений, при которых она способна разрушать преграду, то логично сделать вывод, что в данном случае речи об образовании пены идти не может, а следовательно, данное значение скорости может приниматься как максимальное, при превышении которого будет наблюдаться срыв процесса пенообразования:

$$v_{\max} = \frac{\sigma}{\eta}, \quad (6)$$

где η – динамическая вязкость раствора.

Для численной оценки скоростей необходимо задаться внешними условиями, физико-механическими характеристиками раствора, средним радиусом генерируемых пузырьков. Пусть будут приняты следующие параметры: атмосферное давление – 10^5 Па, плотность раствора – 1000 кг/м^3 , поверхностное натяжение раствора – $0,02 \text{ Н/м}$, динамическая вязкость раствора – $10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$, средний радиус пузырька – 10^{-3} м [6]. Тогда по формуле (4) получается $v_{\min} = 7,1 \text{ м/с}$, а по формуле (5) – $v_{\min} = 10,0 \text{ м/с}$, в то время как по формуле (6) – $v_{\max} = 20,0 \text{ м/с}$. Из двух скоростей, рассчитанных по (4) и (5), в качестве критерия начала процесса пенообразования логично принять наименьшую. Как итог – довольно узкий диапазон скоростей, в пределах которого будет обеспечено генерирование пены в результате взбивания струи раствора о неподвижную поверхность:

$$7,1 \text{ м/с} \leq v_p \leq 20,0 \text{ м/с}, \quad (7)$$

где v_p – скорость раствора при ударе о поверхность, необходимая для образования пены.

Для проверки адекватности описанного механизма образования пены на розетке оросителя необходимо провести экспериментальные исследования.

В качестве критерия начала процесса пенообразования можно аналогично капиллярному числу [7; 8] ввести отношение числа Вебера к числу Рейнольдса, выражающее соотношение между вязким трением и поверхностным натяжением:

$$\frac{We}{Re} = \frac{\eta v}{\sigma}, \quad (8)$$

поскольку оно учитывает не только скорость, раствора, но и его физико-механические свойства. В этом случае условие образования пены при взбивании о поверхность выглядит следующим образом:

$$\frac{\eta}{\sigma} \sqrt{\frac{p_0}{2\rho} + \frac{\sigma}{R\rho}} \leq \frac{We}{Re} \leq 1 \quad (9)$$

или с учетом внешних и внутренних характеристик, принятых в работе

$$0,36 \leq \frac{We}{Re} \leq 1. \quad (10)$$

Таким образом, началом срыва процесса пенообразования можно считать равенство капиллярного числа единице.

Образование пены за счет эжектирования воздуха в раствор (рис. 2б). Образование пены в данном случае осуществляется за счет активного поступления воздуха в месте локального сужения поперечного сечения трубопровода через отверстия в эжекторе смесителя для подачи раствора. Эжектор-смеситель представляет собой устройство, устанавливаемое в трубопровод (рис. 2б) и содержащее участки сужения (конфузор), узкого сечения и расширения (диффузор). Таким образом, за счет снижения давления в узком сечении обеспечивается поступление воздуха из окружающей среды в поток раствора. Пузырьки воздуха в растворе сначала образуют эмульсию «газ-жидкость», затем они поднимаются вверх, образуют на своей поверхности пленку и наслаиваются друг на друга, в результате этого образуется пена.

Оценить скорость раствора v_p , необходимую для образования пены, можно по зависимости, полученной И.В. Качановым с соавторами [9, с. 75]:

$$v_p = \frac{Q\rho}{\pi \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} \rho_{\text{см}} \left(l_{\text{диф}} + \frac{d_0}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \right)^2}, \quad (11)$$

где Q – объемный расход раствора;

α – угол конусности диффузора;

$\rho_{\text{см}}$ – плотность смеси;

$l_{\text{диф}}$ – длина диффузора от начального (сжатого) до начала цилиндрической части;

d_0 – диаметр сжатого сечения.

Для определения плотности смеси предложено использовать формулу [9, с. 78]:

$$\rho_{\text{см}} \approx \frac{\rho(p + p_0)}{p + Kp_0}, \quad (12)$$

где p – давление в сжатом сечении диффузора;

K – кратность пены.

Принимая во внимание, что давление в сжатом сечении значительно меньше атмосферного [9, с. 78], можно записать:

$$K \approx \frac{\rho}{\rho_{\text{см}}}. \quad (13)$$

С учетом геометрии канала длину диффузора можно выразить через диаметр узкого сечения d_0 и диаметр трубопровода $D_{\text{тр}}$:

$$l_{\text{диф}} = \frac{1}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} (D_{\text{тр}} - d_0). \quad (14)$$

После подстановки (13) и (14) в (11) получается:

$$v_p = \frac{4QK}{\pi D_{\text{тр}}^2} = v_{\text{тр}} K, \quad (15)$$

где $v_{\text{тр}}$ – скорость раствора по трубопроводу до эжектора-смесителя.

Получается, что критерием образования пены на выходе раствора из эжектора-смесителя является рост ее скорости в K раз.

Скорость в (15) можно выразить через газосодержание φ [10, с. 14]:

$$v_p = v_{\text{тр}} \frac{1}{1 - \varphi}. \quad (16)$$

Образование пены на сетке (рис. 2в). Механизм образования пены на сетках пеногенератора в настоящее время изучен достаточно хорошо. На сетку (рис. 2в), состоящую из ячеек определенных размеров, движется двухфазный поток из капель раствора и воздуха. Подача воздушного потока происходит через отверстия в пеногенераторе со скоростью, близкой к скорости распыляемого раствора. Капля, попадая на ячейку, закупоривает ее и под давлением заторможенного воздуха деформируется, растягиваясь по ходу потока. В результате деформации возникает полость, заполненная воздухом. Увеличение полости продолжается до тех пор, пока следующая капля опять не закроет ячейку сетки. Так, методом выдувания образуется пузырек пены. Действительный процесс пенообразования на сетке состоит из множества таких элементарных актов непрерывного образования пузырьков пены на каждой ячейке. В результате из пеногенератора выходит относительно однородная по структуре пенная струя.

Характеристики пены зависят, как и в случае взбивания пенной струи на розетке оросителя, от физико-механических характеристик раствора. В отличие от первого случая здесь значительную роль играют размер ячеек сетки, дисперсность распыленной струи и скорость воздуха перед сеткой. Как было установлено ранее, пенообразование на сетках происходит только в определенном интервале скоростей набегающего воздушного потока [1; 2]. При малой скорости воздуха, а также если скорость воздушного потока будет больше верхнего предела, пена не будет образовываться. Остается установить диапазон скоростей, требуемых для образования пены на сетке.

Генерирование пены на сетке методом выдувания аналогично процессу выдувания мыльных пузырей на воздухе с тем лишь различием, что в первом случае имеется сетка, а во втором – плоский монокаркас из жесткой проволоки, на котором при окутании в мыльную воду образуется тонкая пленка. Достаточно детально изучить второй способ, а затем распространить его для случая сетки. Атмосферное давление вдоль пленки на каркасе постоянно, ее поверхность разглаживается, а кривизна стремится к нулю во всех точках. Чтобы получить мыльный пузырь (поверхность минимальной площади без границы), достаточно подуть на пленку, заставляя ее деформироваться и отрываться от каркаса. Данный способ изучен совсем недавно. Причина, по которой он не рассмотрен ранее, – сложность уравнений движения пленки и сильная нелинейность деформаций, которые возникают при отрыве пузыря. Первые статьи, посвященные физике этого процесса, появились только в 2016 г., когда французские ученые (Л. Салкин и др.) проанализировали большое число экспериментальных данных и разработали первую модель, описывающую процесс выдувания мыльных пузырей [11]. Они установили, что основными параметрами, влияющими на диаметр пузырьков, являются размеры ячейки, на которой формируется мыльная пленка, диаметр поперечного сечения потока воздуха, скорость. Также на диаметр пузырька большое влияние оказывают физико-механические свойства раствора (поверхностное натяжение, вязкость, концентрация поверхностно-активных веществ). Влияние размеров ячеек сетки и скорости подачи раствора пенообразователя, а также места установки сетки в насадке пожарного ствола на кратность получаемой пены рассматривалось в работе [12]. Расчет диаметра пузырьков проведен в работах [6; 13].

Таким образом, механизм образования пены методом выдувания на сетках качественно и количественно описан. Кроме того, исследователями даны рекомендации по оценке минимальной скорости подачи раствора пенообразования для начала процесса образования пены [11]:

$$v_{\min} = \sqrt{\frac{8\sigma}{\rho_{\text{в}}a}}, \quad (17)$$

где a – размер ячейки сетки; $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха.

Как видно из формулы (17), чем больше размер ячейки сетки, тем меньше будет значение скорости выдувания. На практике используют мелкую сетку с размерами ячеек от 2,0×2,0 мм и менее. Поэтому при оценке минимальной скорости использовались следующие значения физических величин: $\rho_{\text{в}} = 1,2 \text{ кг/м}^3$, $\sigma = 0,02 \text{ Н/м}$, $a = 0,002 \text{ м}$. Значение максимальной скорости можно получить по формуле (6), т.к. этой скорости достаточно, чтобы начать разрушение материала сетки в месте контакта с раствором. Таким образом, можно записать диапазон скоростей для выдувания пузырьков на сетке, который хорошо согласуется с диапазоном скоростей для взбивания пены на поверхности:

$$8,2 \text{ м/с} \leq v_p \leq 20,0 \text{ м/с}. \quad (18)$$

Условие образования пены при выдувании пузырьков на сетке через We/Re выглядит следующим образом:

$$\frac{\eta}{\sigma} \sqrt{\frac{8\sigma}{\rho_{\text{в}} a}} \leq \frac{We}{Re} \leq 1 \quad (19)$$

или с учетом принятых внешних и внутренних характеристик, принятых в работе,

$$0,41 \leq \frac{We}{Re} \leq 1. \quad (20)$$

Экспериментально скорость срыва пенообразования на сетках установил А.И. Бычков в работе [14]. Им установлено, что срыв процесса пенообразования происходит независимо от количества сеток (от одной до трех), установленных в пеногенераторе, а определяется физико-механическими свойствами раствора и интенсивностью его подачи на сетку. Скорость срыва пенообразования наблюдалась в диапазоне от 20 до 23 м/с при интенсивности орошения сетки $0,13 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, что хорошо согласуется с теоретически определенным значением максимальной скорости.

Образование пены в установках генерирования компрессионной пены (рис. 2з). Механизм образования пены в данном случае самый простой: пузырьки надуваются в среде раствора под давлением от компрессора (поэтому и называется получаемая пена компрессионной) через отверстие в камере смешения. Поскольку можно регулировать как подачу воды, так и подачу пенообразователя и сжатого воздуха, кратность пены становится регулируемой и ею легко управлять [15, с. 147–164]:

$$K = 1 + \frac{p_0 + p_{\text{и}}}{p_0} \cdot \frac{\varphi}{1 - \varphi}, \quad (21)$$

где $p_{\text{и}}$ – избыточное давление на выходе из компрессора.

Полученная пена из камеры смешения по рукавной линии подается к месту тушения пожара. Длина рукавной линии может быть от десятков метров до сотен, поэтому здесь актуальным является вопрос изменения кратности пены, подаваемой на дальние расстояния, по сравнению с кратностью, генерируемой в камере смешения.

Изменение газосодержания по длине рукавной линии можно оценить по эмпирическому выражению [15, с. 165]:

$$\varphi = 0,91 + \ln(\lambda_{\text{прив}} - 0,032)^{1/12}. \quad (22)$$

Здесь $\lambda_{\text{прив}}$ – приведенный коэффициент гидравлического трения:

$$\lambda_{\text{прив}} = \frac{\pi^2 D_{\text{тр}}^5 (p_{\text{и}} - p_{\text{ств}})}{8l\rho Q^2}, \quad (23)$$

где $p_{\text{ств}}$ – избыточное давление на стволе (в конце рукавной линии).

Значения приведенного коэффициента гидравлического трения находятся в интервале [15, с. 165]:

$$0,032 \leq \lambda_{\text{прив}} \leq 0,9, \quad (24)$$

где значение $\lambda_{\text{прив}} = 0,032$ соответствует приведенному коэффициенту гидравлического трения при течении по рукавной линии воды.

Зная текущее значение φ , всегда можно по формуле (21) рассчитать кратность получаемой пены.

Заключение

В работе рассмотрены концептуальные подходы к описанию механизмов образования воздушно-механической пены низкой кратности для нужд пожаротушения. Описаны механизмы генерирования пены на поверхности розеток пенных оросителей автоматических систем пожаротушения методом взбивания, на сетках в насадках на пожарные стволы методом выдувания, а также за счет введения в камеру смешения воздуха. Дана оценка диапазонов скоростей, в пределах которых будет обеспечен процесс пенообразования.

Предложенные подходы позволяют проводить расчеты минимальной и максимальной скоростей для потока жидкости (коэффициент поверхностного натяжения, динамическая вязкость, плотность раствора и смеси) с любым пенообразователем, в диапазоне которых обеспечивается генерирование пены для широкого класса пеногенерирующих устройств (размер ячеек сетки, длина рукавной линии): для пенных оросителей – условия (9), для насадков на пожарные стволы – условия (19). Кроме того, описаны особенности формирования пены в смесителях при эжектировании воздуха и при подаче компрессионной пены.

ЛИТЕРАТУРА

1. Навроцкий, О.Д. Повышение кратности пены водных растворов ПАВ / О.Д. Навроцкий, С.Г. Котов // *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*. – 2007. – Т. 6, № 2. – С. 49–56. – EDN: STSCWP.
2. Кокшаров, А.В. Определение критических параметров образования пены на сетках пеногенератора средней кратности / А.В. Кокшаров, С.И. Осипенко // *Техносферная безопасность*. – 2017. – № 1 (14). – С. 35–38. – EDN: YHNVWN.
3. Безродный, И.Ф. Забытые имена – забытые знания... или «Почему не тушит пена?..» / И.Ф. Безродный // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2011. – Т. 20, № 12. – С. 49–55. – EDN: ONZENF.
4. Копылов, С.Н. Исследование влияния экспериментального оборудования на результаты испытаний пенообразователя по ГОСТ Р 50588–2012 / С.Н. Копылов [и др.] // *Актуальные вопросы пожарной безопасности*. – 2020. – № 1 (3). – С. 26–33. – EDN: GBWGRS.
5. Ковалев, В.И. Основные физические параметры процесса соударения струи суспензии с преградой с безножевой размольной установкой / В.И. Ковалев, А.А. Ерофеева, Ю.Д. Алашкевич // *Химия растительного сырья*. – 2009. – № 3. – С. 165–168. – EDN: KYRBHP.
6. Камлюк, А.Н. Влияние размеров ячейки сетки и расстояния от сопла на дисперсность пены / А.Н. Камлюк [и др.] // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. – 2022. – Т. 6, № 4. – С. 441–450. – DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-4.441. – EDN: GNBQTD.
7. Попков, В.И. Гидродинамическое моделирование фильтрации при малых значениях капиллярного числа / В.И. Попков, С.В. Зацепина, В.П. Шакшин // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки*. – 2005. – № 34. – С. 163–170. – EDN: ISCORF.
8. Скрипкин, А.Г. Экспериментальные исследования кривой капиллярного осушения при ПАВ-полимерном заводнении / А.Г. Скрипкин, И.Н. Кольцов, С.В. Мильчаков // *PRОнефть. Профессионально о нефти*. – 2021. – Т. 6, № 1. – С. 40–46. – EDN: QWLMKE.
9. Качанов, И.В. Установки автоматического пожаротушения с предварительной аэрацией огнетушащей рабочей среды / И.В. Качанов, И.В. Карпенчук, С.Ю. Павлюков. – Минск: БНТУ, 2018. – 149 с.
10. Канн, К.Б. Капиллярная гидродинамика пен / К.Б. Канн. – Новосибирск: Наука: Сибирское отделение, 1989. – 167 с. – ISBN: 5-02-028655-9.

11. Salkin, L. Generation soap bubbles by blowing on soap films / L. Salkin [et. al.] // *Physical Review Letters*. – 2016. – Vol. 116, No. 7. – Article 077801. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.077801.
12. Камлюк, А.Н. Ствол пожарный ручной универсальный комбинированный с расходом до 5 л/с и возможностью формирования воздушно-механической пены / А.Н. Камлюк, В.В. Пармон, А.А. Морозов // *Научные и образовательные проблемы гражданской защиты*. – 2019. – № 1 (40). – С. 76–85. – EDN: ZEUEPZ.
13. Чан, Д.Х. Оценка диаметра пузырьков и скорости потока пенообразующей смеси для их образования на сетке пеногенерирующих устройств / Д.Х. Чан [и др.] // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. – 2022. – Т. 6, № 1. – С. 84–94. – DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-1.84. – EDN: QAENWG.
14. Бычков, А.И. О срыве пенообразования на сетках / А.И. Бычков // *Материалы VII Всесоюзной науч.-практ. конф. «Горение и проблемы тушения пожаров»: Секция «Тепломассообмен в условиях пожара»*. – М.: ВНИИПО, 1981. – С. 17–20.
15. Камлюк, А.Н. Компрессионная пена для нужд пожарных подразделений: монография / А.Н. Камлюк, А.В. Грачулин. – Минск: УГЗ, 2019. – 224 с. – ISBN: 978-985-590-050-5.

**Количественное описание механизмов образования воздушно-механической пены
низкой кратности для нужд пожаротушения**

**Quantitative description of the mechanisms of formation of low multiplicity air-mechanical
foam for firefighting needs**

Камлюк Андрей Николаевич

кандидат физико-математических наук,
доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», заместитель
начальника университета по научной
и инновационной деятельности

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

Email: kan@ucp.by

SPIN-код: 8858-0296

Andrey N. Kamlyuk

PhD in Physics and Mathematics Sciences,
Associate Professor

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Deputy Chief of the University
on Scientific and Innovative Activity

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

Email: kan@ucp.by

ORCID: 0000-0002-9347-0778

ScopusID: 57218325403

QUANTITATIVE DESCRIPTION OF THE MECHANISMS OF FORMATION OF LOW MULTIPLICITY AIR-MECHANICAL FOAM FOR FIREFIGHTING NEEDS**Kamlyuk A.N.**

Purpose. To theoretically evaluate the influence of various factors on the generation of air-mechanical foam obtained in fire extinguishing devices. To compare the obtained data with the results of experimental studies.

Methods. Theoretical and empirical methods of analysis were used in the research process.

Findings. As a result of calculations, the data on the limiting (minimum and maximum) speeds for the liquid flow were obtained, in the range of which the generation of low-expansion air-mechanical foam is ensured for a wide class of foam-generating devices. The mechanisms of foam generation on grids in nozzles of fire trunks by the blowing method, on the surface of foam sprinkler rosettes of automatic fire extinguishing systems by the whipping method, and also by introducing air into the mixing chamber are considered.

Application field of research. The results of the analysis can be used in the development of foam-generating devices, as well as to determine the optimal modes of their operation.

Keywords: foam, bubble diameter, bubble blowing speed, bubble whipping speed, multiplicity, stability, dispersion, gas content, ejector, mesh, sprinkler.

(The date of submitting: July 10, 2024)

REFERENCES

1. Navrotsky O.D., Kotov S.G. Povyschenie kratnosti peny vodnykh rastvorov PAV [Increasing the foam multiplicity of aqueous solutions of surfactants]. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*, 2007. Vol. 6, No. 2. Pp. 49–56 (rus). EDN: STSCWP.
2. Koksharov A.V., Osipenko S.I. Opredelenie kriticheskikh parametrov obrazovaniya peny na setkakh penogeneratora sredney kratnosti [The determination of the critical parameters of the foam generation on the grid foam generator average multiplicity]. *Technosphere safety*, 2017. No. 1 (14). Pp. 35–38 (rus). EDN: YHMVWN.
3. Bezrodnyy I.F. Zabytye imena – zabytye znaniya... ili «Pochemu ne tushit pena?...» [Forgotten names – forgotten knowledge... or «Why doesn't the foam put out the fire...?». *Fire and Explosion Safety*, 2011. Vol. 20, No. 12. Pp. 49–55 (rus). EDN: ONZENF.
4. Kopylov S.N., Shentyapin D.S., Baranov E.V., Grishin V.V., Arkhipov E.E. Issledovanie vliyaniya eksperimental'nogo oborudovaniya na rezul'taty ispytaniy penoobrazovatelya po GOST R 50588–2012 [Study of the experimental equipment influence on the results of frother tests according to GOST R 50588–2012]. *Current Fire Safety Issues*, 2020. No. 1 (3). Pp. 26–33 (rus). EDN: GBWGRS.
5. Kovalev V.I., Erofeeva A.A., Alashkevich Yu.D. Osnovnye fizicheskie parametry protsessa soudareniya strui suspenzii s pregradoy s beznozhevoy razmol'noy ustanovke [Fundamental physical parameters of collision process jets suspension with a barrier in knifeless mechanical installation]. *Khimiya ras-titel'nogo syr'ya*, 2009. No. 3. Pp. 165–168 (rus). EDN: KYRBHP.
6. Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Titovets A.F., Polochanin N.S., Grachulin A.V. Vliyanie razmerov yacheyki setki i rasstoyaniya ot sopla na dispersnost' peny [Influence of the dimensions of the grid cell and the distance from it to the nozzle of the foam-generating device on the foam dispersion]. *Journal of Civil Protection*, 2022. Vol. 6, No. 4. Pp. 441–450. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-4.441. EDN: GNBQTD.
7. Popkov V.I., Zatsepina S.V., Shakshin V.P. Gidrodinamicheskoe modelirovanie fil'tratsii pri malykh znachenyakh kapillyarnogo chisla [Hydrodynamic modeling of filtration at low capillary number values]. *Journal of Samara State Technical University. Series: Physical and Mathematical Sciences*, 2005. No. 34. Pp. 163–170. (rus). EDN: ISCORF.
8. Skripkin A.G., Kol'tsov I.N., Mil'chakov S.V. Eksperimental'nye issledovaniya krivoy kapillyarnogo osusheniya pri PAV-polimernom zavodnenii [Experimental studies of the capillary desaturation curve in polymer-surfactant flooding]. *PROneft. Professionally About Oil*, 2021. Vol. 6, No. 1. Pp. 40–46. (rus). EDN: QWLMKE.
9. Kachanov I.V., Karpenchuk I.V., Pavlyukov S.Yu. Ustanovki avtomaticheskogo pozharotusheniya s predvaritel'noy aeratsiey ogetushashchey rabochey sredy [Automatic fire extinguishing installations with preliminary aeration of the working medium].

- with preliminary aeration of the fire extinguishing working environment]. Minsk: Belarusian National Technical University, 2018. 149 p. (rus)
10. Kann K.B. *Kapillyarnaya gidrodinamika pen* [Capillary hydrodynamics of foams]. Novosibirsk: Nauka, 1989. 167 p. (rus). ISBN: 5-02-028655-9.
 11. Salkin L., Schmit A., Panizza P., Courbin L. Generating soap bubbles by blowing on soap films. *Physical Review Letters*, 2016. Vol. 116, No. 7. Article 077801. DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.077801.
 12. Kamlyuk A.N., Parmon V.V., Morozov A.A. Stvol pozharney ruchnoy universal'nyy kombinirovanny s raskhodom do 5 l/s i vozmozhnost'yu formirovaniya vozdušno-mekhanicheskoy peny [Universal fire-fighter manual fire barrel combined with a flow rate of up to 5 l/s and the possibility of forming an air-mechanical foam]. *Scientific & Educational Problems of the Civil Protection*, 2019. No. 1 (40). Pp. 76–85. (rus). EDN: ZEUEPZ.
 13. Chan D.Kh., Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Grachulin A.V., Platonov A.S., Titovets A.F. Otsenka diametra puzyr'kov i skorosti potoka penoobrazuyushchey smesi dlya ikh obrazovaniya na setke peno-generiruyushchikh ustroystv [Evaluation of the bubbles diameter and the blowing speed of the air-mechanical foam forming bubbles on the screen of the foam generators]. *Journal of Civil Protection*, 2022. Vol. 6, No. 1. Pp. 84–94. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-1.84. EDN: QAEHWG.
 14. Bychkov A.I. O sryve penoobrazovaniya na setkakh [About foaming disruption on the nets]. *Proc. of VII All-Union scientific-practical conf. «Gorenie i problemy tusheniya pozharov»: Section «Teplomassoobmen v usloviyakh pozhara»*. Moscow: FGBU VNIPO of EMERCOM of Russia, 1981. Pp. 17–20. (rus)
 15. Kamlyuk A.N., Grachulin A.V. *Kompressionnaya pena dlya nuzhd pozharnykh podrazdeleniy* [Compression foam for the needs of fire departments]: monograph. Minsk: University of Civil Protection, 2019. 224 p. (rus). ISBN: 978-985-590-050-5.