

УДК 622.822.22:614.844.5

Мамаев В.В., доктор технических наук
Момот Д.И., научный сотрудник
НИИГД «Респиатор», г. Донецк

НОВЫЙ СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ГАЗОМЕХАНИЧЕСКОЙ ПЕНЫ НА СЕТКАХ

Одним из средств предупреждения и тушения, а также локализации эндогенных пожаров является газомеханическая пена [1, 2], которая подаётся в труднодоступные места по трубопроводам или скважинам малого сечения (75-100 мм). Существующие для этой цели устройства позволяют получать пену низкой кратности, что снижает эффективность её применения из-за невозможности заполнения пеной до кровли в куполах большого объёма и размыва почвы углеспускных скатов на пластах крутого залегания угля.

Подача пены под давлением по трубопроводам и скважинам в труднодоступные места для предупреждения и тушения эндогенных пожаров в шахтах осуществляется при помощи специально разработанных для этих целей сеточных установок и устройств. В сеточных пеногенераторных установках образование газомеханической пены происходит при набрызгивании на сетку раствора пенообразователя и одновременном продувании через сетку газа. Однако, в этих установках зачастую происходит срыв процесса генерирования пены ввиду нарушения следующих условий:

радиус капли раствора пенообразователя меньше полуторакратного размера ячейки пеногенирующей сетки;

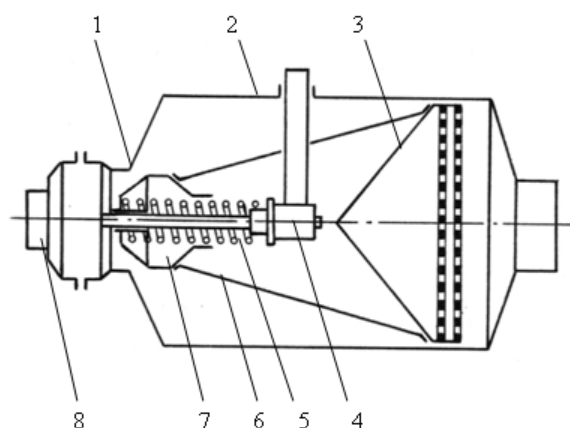
скорость газового потока у сетки не позволяет обеспечить устойчивое образование пены и заданную скорость пенного потока.

В разработанных ранее для этих целей сеточных пеногенераторных установках и устройствах, таких как «Экран», ВГПУ-12, УПГВ, УЛЭП-2 потоки водного раствора пенообразователя и сжатого газа поступают вместе на пеногенирующую сетку с одной стороны.

Для улучшения качества водного раствора пенообразователя применяют стабилизирующие добавки. По техническим причинам не всегда возможно использование шахтного противопожарного трубопровода для подачи воды. Проблему водоснабжения для получения раствора пенообразователя в ряде случаев решают, используя шахтные сточные воды. Однако, когда такой раствор подается через распылитель (форсунку) на пеногенирующую сетку, загрязняется распылитель, а стабилизирующие примеси и твердые частицы, содержащиеся в воде, налипают на сетку. Сжатый воздух, который поступает в направлении

потока водного раствора пенообразователя, способствует адгезии этих частиц к пеногенерирующей сетке и не в состоянии протолкнуть их через нее. В связи с этим, сетка загрязняется, уменьшается ее сечение, и процесс генерирования пены прекращается. После этого сетка вынимается из кассеты, очищается от мусора и грязи, устанавливается обратно в устройство и работа по получению газомеханической пены продолжается. Чистка сетки и распылителя является операцией сложной, трудоёмкой и требующей значительных затрат времени.

Одним из недостатков использования пеногенераторов является их неустойчивая работа. По мере увеличения длины пенного потока в трубопроводах или скважинах растёт сопротивление пеногенератору, т.е. перепад давления на оросительной форсунке снижается, что приводит к уменьшению расхода и угла распыления пенообразующего раствора. При этом поверхность пеногенерирующей сетки не полностью покрывается раствором, в результате нарушается процесс пенообразования и изменяется кратность получаемой пены. При дальнейшем росте противодействия процесс пенообразования вообще прекращается. Для решения этой проблемы решено корпус между патрубком и распылителем выполнить в виде трубки Вентури (см. рис. 1), на выходе которой установлен подпружиненный обтекатель [3].



1 – трубка Вентури; 2 – корпус пеногенератора; 3 – сетка; 4 – распылитель;
5 – пружина; 6 – тяга; 7 – обтекатель; 8 – патрубок
Рисунок 1 – Схема пеногенераторной установки УПГВ

Пеногенераторная сетка свободно установлена в корпусе, но в то же время жёстко связана тягами с обтекателем. По мере роста длины пенного потока увеличивается сопротивление в трубопроводе, снижая скоростной напор газа. Соответственно снижается перепад давления, расход на распылителе и угол давления на обтекатель и сетки. При этом уменьшается усилие, действующее на обтекатель и сетки, в результате чего под действием пружины обтекатель и сетки перемещаются в сторону

распылителя, тем самым сетка снова орошается и процесс генерирования пены продолжается. Как и в предыдущих установках, набрызг раствора пенообразователя и подача газа на сетку происходит с одной стороны. Однако, не смотря на попытки решения задачи устойчивой работы пеногенераторов с заданной кратностью пены, она не была полностью решена.

После проведения технического анализа существующих установок было установлено, что они имеют ряд существенных недостатков в процессе получения и транспортировки газомеханической пены. Результаты анализа и практика проектирования пеногенераторных установок свидетельствуют о том, что наибольшую трудность представляет проектирование узла, в котором осуществляется непосредственный контакт раствора пенообразователя и газового потока. В сеточных пеногенераторах таким узлом является пакет пеногенерирующих сеток. Все существующие в настоящее время пеногенераторы способны использовать только очищенную воду, подаваемую из шахтного противопожарного трубопровода и не содержащую механических примесей.

Для устранения вышеприведенных недостатков сеточных пеногенераторных установок и устройств был изготовлен экспериментальный стенд устройства для исследования процесса получения газомеханической пены.

Первая серия экспериментов была проведена по классической схеме получения газомеханической пены, когда на сетку поступает газ и раствор пенообразователя с одной стороны. Пеногенерирующая сетка расположена перпендикулярно к направлению движения раствора пенообразователя и газа. При такой схеме участвуют все вышеприведенные ограничения при получении пены, которые отразились на параметрах классического трубного сеточного пеногенератора (максимальная производительность по пене $5 \text{ м}^3/\text{мин}$ при максимальном давлении $0,5 \text{ МПа}$) [4]. В данном случае потери раствора пенообразователя возникают в связи с тем, что капли раствора диаметром меньше размера стороны пеногенерирующей сетки, не участвуют в процессе пенообразования. Установлены недостатки данной схемы получения газомеханической пены:

1. Потери раствора пенообразователя. Капли набрызгиваемого на сетку раствора пенообразователя, диаметр которых меньше размера стороны ячейки пеногенерирующей сетки, не участвуют в процессе пенообразования и уходят вместе с пенным потоком.

2. Засорение ячеек пеногенерирующей сетки при использовании шахтной неочищенной воды для приготовления раствора пенообразователя и, как следствие, прекращение процесса пеногенерации. Применение стабилизирующих добавок, в частности бентонитовой глины,

также приводит к засорению пеногенерирующей сетки и невозможности получения пены.

Вторая серия экспериментов проводилась также по классической схеме, но с наклоном пеногенерирующей сетки к поверхности корпуса пеногенераторной установки. Наклон сетки к направлению потока раствора пенообразователя определялся расчётным путём и затем подтвердился экспериментами. Серия экспериментов проводилась на стенде для наклона сетки под углом 45° , 30° , 25° , 20° и 15° . Оптимальный угол наклона сетки к потоку составил 20° . В этих условиях для движущейся капли раствора пенообразователя ячейка сетки является в вертикальной проекции квадратом, размер которого стремится к нулю, а поверхность сетки в проекции к движущейся капле есть гладкая поверхность. В этом случае сетка для любого размера капель является гладкой поверхностью, по которой капля растекается и образует плёнку на ячейке. Потери раствора пенообразователя в данном случае сведены к минимуму.

Кроме того, в данной серии также проводились экспериментальные исследования с добавлением в раствор пенообразователя стабилизирующих добавок (бентонитовой глины) и других механических примесей.

Недостатком данной схемы получения газомеханической сетки является засорение пеногенерирующей сетки как и при классической схеме, хотя и в меньшей степени. Это связано с тем, что часть механических примесей, содержащихся в растворе пенообразователя, удаляется с сетки за счёт её наклона к направлению потока газа и раствора пенообразователя.

Как в I, так и во II серии экспериментов для набрызгивания раствора пенообразователя на сетку применялись серийно выпускаемые форсунки зонтичного и конусного типов. Применение в растворе пенообразователя стабилизирующих добавок и механических примесей приводит к их засорению наряду с пеногенерирующей сеткой.

Условия формирования пены и ограничения на скорость газового потока, обеспечивающие устойчивый режим формирования пены при подаче пенообразователя на вертикальные сетки, для отдельной её ячейки были исследованы НИИГД. Однако для случая наклонных сеток необходимо знать поля скоростей, давлений и концентрации раствора пенообразователя как в поперечных, так и в продольных сечениях объёма корпуса пеногенератора. В данных исследованиях, в ходе разработки конструкции устройства, с целью увеличения площади сетки, омываемой пенообразователем, принято решение о переходе от плоской формы сетки, к вытянутой, конусообразной поверхности с подачей пенообразователя с вершины сетки внутрь её объёма. Так как площадь классической плоской сетки составляет

$$S = \frac{1}{4} \pi D^2, \quad (1)$$

где D – диаметр трубопровода, м,

а площадь конусообразной сетки

$$\tilde{S} = \frac{1}{4} \pi D^2 \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \alpha}}, \quad (2)$$

α – угол наклона образующей поверхности сетки к стенкам трубопровода, °,

то соотношение площадей s составит:

$$s = \sqrt{1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \alpha}}. \quad (3)$$

При $\alpha \rightarrow \pi/2$, $s \rightarrow 1$, а при $\alpha \rightarrow 0$, $s \rightarrow \infty$, т. е. выигрыш в площади очевиден с уменьшением угла наклона. Однако, по мере уменьшения угла наклона увеличивается протяженность сетки и после определённого предела рабочая часть будет ограничена дальностью подачи пенообразователя. Кроме того, эта конструкция повысит аэродинамическое сопротивление поверхности сетки газовому потоку. С другой стороны, по технологическим причинам угол наклона сетки не должен превышать угол расхождения струи пенообразователя из форсунки. Для выбора оптимального угла наклона были выполнены исследования процесса истечения дисперсной струи в ограниченное пространство, заполненное газом высокого давления [5].

Принимается, что струя пенообразователя, истекающая из форсунки – кольцевая и симметричная относительно геометрической оси корпуса пеногенерирующего устройства. Вводится продольная координата x , м, по направлению потока пенообразователя, отсчитываемая от конечного сечения клапана, и поперечная y , м, отсчитываемая от оси x в радиальном направлении (рис. 2).

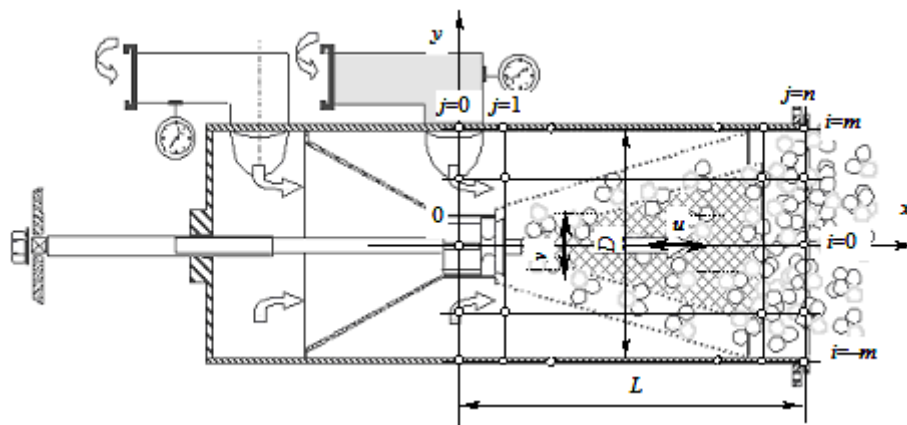


Рисунок 2 – Расчётная схема для моделирования работы пеногенератора

Перенос количества движения и массы раствора пенообразователя и газа моделируются уравнением обобщённого вида [6]:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho \Phi) + \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} = I, \quad (4)$$

где τ – время, с;

ρ – плотность пенообразователя и газа, кг/м³;

J_x , J_y – суммарные конвективно-диффузионные потоки массы или количества движения, размерность которых зависит от вида переносимой субстанции;

Φ – физическая переменная (скорость и плотность газа и пенообразователя, концентрация пенообразователя и т.д.);

I – импульс, размерность которого зависит от вида переносимой субстанции.

В частности, в двумерной постановке, на основании (4), для составляющих скоростей его движения по x : $\Phi = u$, м/с, и по y : $\Phi = v$, м/с получаем систему уравнений:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 - \mu \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v u - \mu \frac{\partial u}{\partial y}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + I_x, \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u v - \mu \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v^2 - \mu \frac{\partial v}{\partial y}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + I_y, \quad (6)$$

где ρ – плотность пенообразователя и газа, кг/м³;

P – давление, Па;

I_x , I_y – импульс тяги (движения), Н/м³.

Ввиду высокого напора источников подачи раствора

пенообразователя и азота длительность переходных процессов незначительна. Кроме того, представляет интерес предельный, установившийся режим работы пеногенератора, который он может обеспечить в зависимости от качества изготовления вспомогательных узлов, давления, концентрации раствора пенообразователя внутри корпуса и, соответственно, производительности и дальности подачи пены. Поэтому рассматривалась задача в стационарной постановке при установившемся процессе генерации пены. Особенностью моделирования плоского истечения кольцевой струи в данных условиях являются граничные условия на поверхности сетки, где продольные и поперечные составляющие скорости и градиенты давления равны нулю.

Такая постановка граничных условий позволяет моделировать множество вариантов процесса подачи газа и раствора пенообразователя внутрь оболочки пеногенератора (противонаправлено, сонаправлено, под углом) при различном расположении сетки в пределах объёма устройства и в зависимости от его геометрических размеров и давления в трубопроводной части.

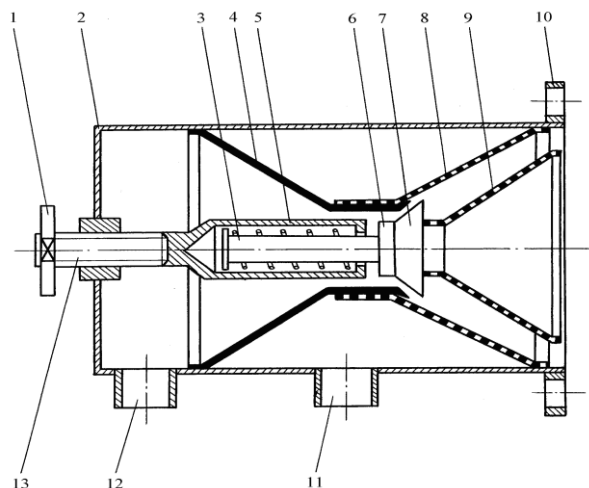
На основании результатов теоретических исследований предложена схема получения пены, которая предусматривает подачу раствора пенообразователя и газа с разных сторон пеногенерирующей сетки [7], расположенной под углом к направлению движения раствора пенообразователя и газа.

По этой схеме выполнены исследования получения газомеханической пены с использованием шахтной неочищенной воды, содержащей механические примеси, с добавлением бентонитовой глины. Попадающие на поверхность пеногенерирующей сетки примеси сдуваются потоком, идущим с противоположной стороны сетки, а её наклон к корпусу пеногенератора исключает первое условие. За счёт наклона пеногенерирующей сетки увеличилась её поверхность, что позволило более рационально использовать раствор пенообразователя. Для исключения засорения форсунки была разработана принципиально новая форсунка – кольцевого типа. Изменение размера кольцевой щели позволяет регулировать расход раствора пенообразователя непосредственно на установке. Кольцевая форсунка зарекомендовала себя надёжной в применении, при использовании стабилизирующих добавок не наблюдалось случаев её засорения.

На первом этапе испытания разрабатываемого пеногенератора проводились с использованием одной пеногенерирующей сетки в виде конуса со срезанной вершиной [8]. Благодаря направленному разбрызгиванию раствора пенообразователя через кольцевую форсунку используется вся площадь конусной пеногенерирующей сетки, а потери раствора сведены к минимуму. Серией экспериментальных исследований установлен оптимальный угол наклона пеногенерирующей сетки к

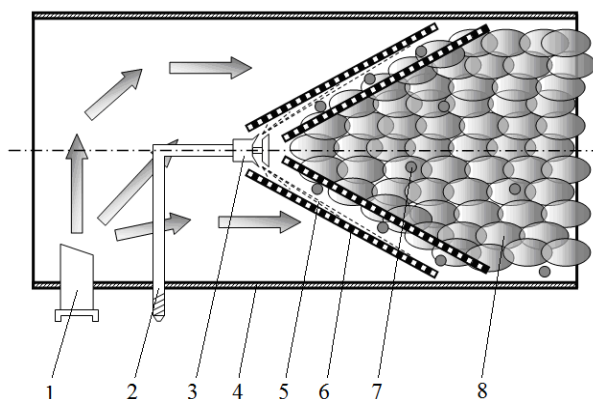
продольной оси корпуса пеногенератора, который составляет 20° .

При подаче расчётного количества газа и раствора пенообразователя кратность получаемой газомеханической пены была выше, чем предполагалось. Результаты проведенных исследований показали, что часть раствора пенообразователя не участвовала в процессе пеногенерации и уходила вместе с потоком пены. Для исключения потерь пенообразователя был применён пакет из двух пеногенирующих сеток (см. рис. 3, 4).



1 – рукоятка; 2 – корпус; 3 – шток; 4 – разделитель потоков; 5 – втулка; 6 – распылитель; 7 – запорный элемент; 8, 9 – сетка; 10 – фланец; 11, 12 – штуцер; 13 – винт

Рисунок 3 – Схема устройства для получения газомеханической пены



1 – патрубок для подвода воздуха (инертного газа); 2 – патрубок для подвода раствора пенообразователя; 3 – форсунка; 4 – корпус; 5 – раствор пенообразователя; 6 – пеногенирующая сетка; 7 – раствор пенообразователя, не участвующий в процессе пеногенерации; 8 – воздушно-механическая (инертная) пена

Рисунок 4 – Схема подачи газа и раствора пенообразователя на сетку с противоположных сторон

Данный пакет сеток конструктивно выполнен таким образом, что расположение внутренней сетки позволило свести к минимуму потери раствора пенообразователя. Механические примеси, содержащиеся в растворе пенообразователя, удаляются с пеногенерирующих сеток напором газа в поток пены, соответственно не происходит срыва процесса пеногенерации и, что важно, не приводит к изменению выбранной кратности газомеханической пены. Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований показали, что при работе ПВТ [9] не наблюдается отклонений: заранее выбранная кратность пены соответствует генерируемой; не происходит срыва процесса пеногенерации; кратность пены можно изменять в непосредственно процессе работы установки.

Список литературы

1. Пашковский П.С. Актуальные вопросы борьбы с самовозгоранием угля: сб. науч. тр. / П.С. Пашковский, С.П. Греков, И.Н. Зинченко. – Донецк: ЧП «Арпи», 2012. – 656 с.
2. Чуприков А.Е., Островлярчик Л.В. Тушение подземных пожаров в труднодоступных местах // Локализация и тушение подземных пожаров: Сборник статей / ВО ВНИИГД. Кемерово, 1983. № 10. – С. 13-16.
3. Пеногенераторная высоконапорная установка / В.П. Засевский, С.Я. Мерайс, Л.Д. Вишневский, В.И. Нетреба // Горноспасательное дело: Сб. науч. тр. / НИИГД. – Донецк, 1992. – С. 112–115.
4. Автоматическое регулирование кратности пены / П.С. Пашковский, В.П. Засевский, М.А. Яремчук // Горноспасательное дело: Сб. науч. тр. / НИИГД. – Донецк, 2000. – С. 26–30.
5. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. – М., Энергия, 1976. – 296 с.
6. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкостей. – М. – Энергоатомиздат. – 1993. – 150 с.
7. Момот Д.И. Обоснование конструктивных параметров пеногенератора высоконапорного трубного // Пожежна безпека: Зб. наук. праць / ЛПБ. – Львів, 2005 – № 7. – С. 78 – 84.
8. Попов Э.А., Момот Д.И. Экспериментальные исследования получения пены в трубных сеточных пеногенераторах / Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений: Сб. научн. тр. / «Норд – пресс». – Донецк, 2003, С. 38–41.
9. Пат. 61615 Україна, МПК⁷ A62 C 5/02, E21 F 5/02. Пристрій для одержання газомеханічної піни / Е.А. Попов, П.С. Пашковський, Д.І. Момот; заявл. і патентовл. НДІГС «Респіратор». – № 2003032316; заявл. 18.03.2003; опубл. 15.09.2005. Бюл. № 9 від 15.09.2005.