

Д.И. Момот (НИИ горноспасательного дела и пожарной безопасности «Респиратор», г. Донецк)

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕНОГЕНЕРАТОРА ВЫСОКОНАПОРНОГО ТРУБНОГО

Построена математическая модель и представлены результаты моделирования распределения полей скоростей и концентраций раствора пенообразователя внутри корпуса высоконапорного трубного пеногенератора в зависимости от давления в его трубопроводной части и пропускной способности форсунки. Это позволяет при заданной аэродинамической характеристике сети трубопроводов выбирать конструкцию пенообразующей сетки, обеспечивающую оптимальный режим работы устройства и прогнозировать производительность в зависимости от степени регулирования подачи раствора пенообразователя и азота.

Пеногенератор высоконапорный трубный (ПВТ) [1] используется для получения газомеханической пены и её подачи по трубопроводу в труднодоступные места при профилактике и тушении шахтных эндогенных пожаров.

Режим работы пеногенератора зависит от физико-химических свойств раствора пенообразователя, давления в сети трубопроводов и аэродинамических качеств самого устройства (рис. 1).

Поэтому при поиске оптимальной конструкции ПВТ, обеспечивающей необходимую производительность пены и дальность её подачи, возникает необходимость в разработке математической модели режима работы пеногенераторной установки в зависимости от аэродинамических и физико-химических параметров всех её узлов и компонентов. Наличие модели позволит производить целенаправленный, аргументированный выбор конструкции ПВТ до его изготовления и избежать неоправданные трудовые и материальные затраты.

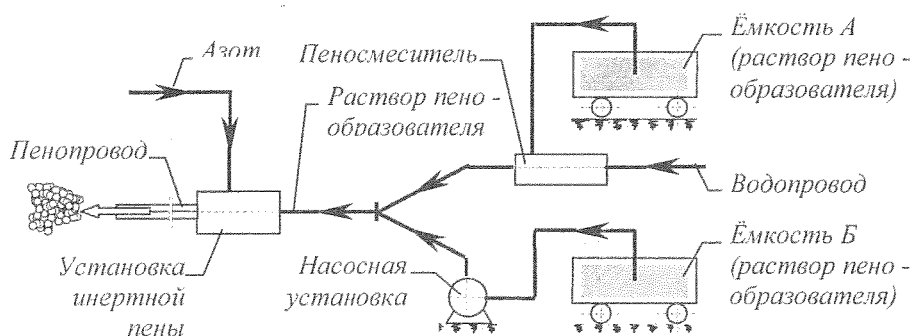


Рис. 1. Схема получения пены с помощью ПВТ

Отличительной особенностью способа получения пены в ПВТ, по сравнению с известными [2-6], является то, что раствор пенообразователя подается на наклонную, а не вертикальную сетку (рис. 2).

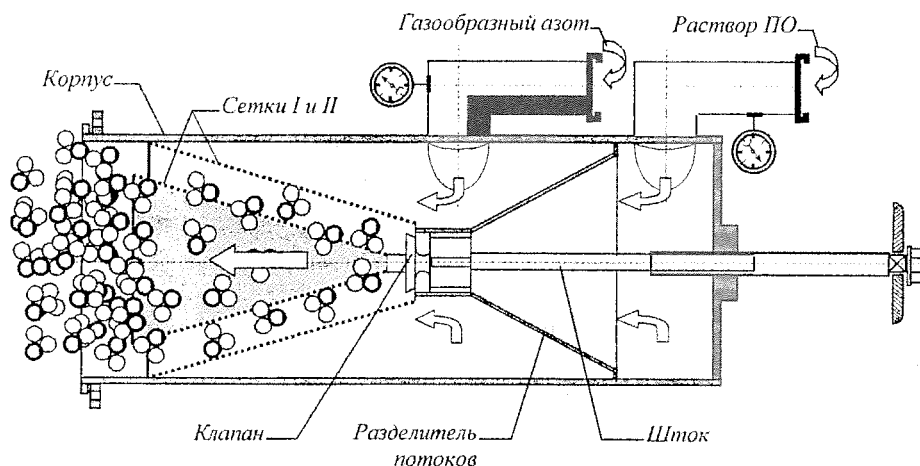


Рис. 2. Схема конструкции ПВТ

В узле ПВТ происходит истечение газа (азота) в жидкую среду (раствор пенообразователя). Слой жидкости, через который продувается (барботирует) газ, называется динамическим двухфазным (двухкомпонентным) слоем [4]. Благодаря тому, что истечение происходит через сетку – образуются пузырьки пены. Пена – ячеисто-плёночная система, отдельные пузырьки которой связаны друг с другом разделяющими их плёнками в общий каркас. Толщина слоя пены определяется соотношением среднего срока существования отдельных пузырьков и интенсивностью подхода новых пузырьков.

Пенообразователь – вязкая среда, которая содержит поверхностно-активные вещества. Эти вещества располагаются на оболочках пузырьков (границах раздела фаз), что увеличивает длительность их существования. Дополнительную устойчивость пене придают также твёрдые частички грязи, присутствующие в шахтных водах и взвешенные в растворе пенообразователя. Кроме того, в "пенящейся" жидкости пузырьки слабее агрегируются и медленнее всплывают, а достигнув поверхности слоя, медленнее разрушаются.

Условия формирования пены и ограничения на скорость газового потока, обеспечивающие устойчивый режим формирования пены при подаче раствора пенообразователя на вертикальные сетки, для отдельной её ячейки детально изучены в работах [3-5]. Однако для случая наклонных сеток необходимо знать поля скоростей, давлений и концентрации раствора пенообразователя как в поперечных, так и в продольных сечениях объёма корпуса ПВТ.

В данных исследованиях, в ходе разработки конструкции ПВТ, с целью увеличения площади сетки, омываемой раствором пенообразователя, принято решение о переходе от плоской формы сетки к выпянутой, конусообразной поверхности с подачей раствора пенообразователя с вершины сетки внутрь её объёма. Так как площадь классической плоской

сетки составляет $S = \frac{1}{4} \pi D^2$, где D – диаметр трубопровода, M , а площадь конусообразной –

$\tilde{S} = \frac{1}{4} \pi D^2 \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\text{tg}^2 \alpha}}$, где α – угол наклона образующей поверхности сетки к стенкам

трубопровода, °, то соотношение площадей S составит:

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

При $\alpha \rightarrow \frac{\pi}{2}$, $s \rightarrow 1$, 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 раствора пенообразователя. Кроме того, эта реконструкция 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 производится постановка и решение задачи истечения дисперсной струи в ограниченное пространство, заполненное газом высокого давления [7].

Принимается, что струя раствора пенообразователя, истекающая из форсунки (системы разделитель потока, шток, клапан) – кольцевая и симметричная относительно геометрической оси корпуса ПВТ. Вводится продольная координата x , по направлению потока пенообразователя, отсчитываемая от конечного сечения клапана, и поперечная y , отсчитываемая от оси x в радиальном направлении (рис. 3).

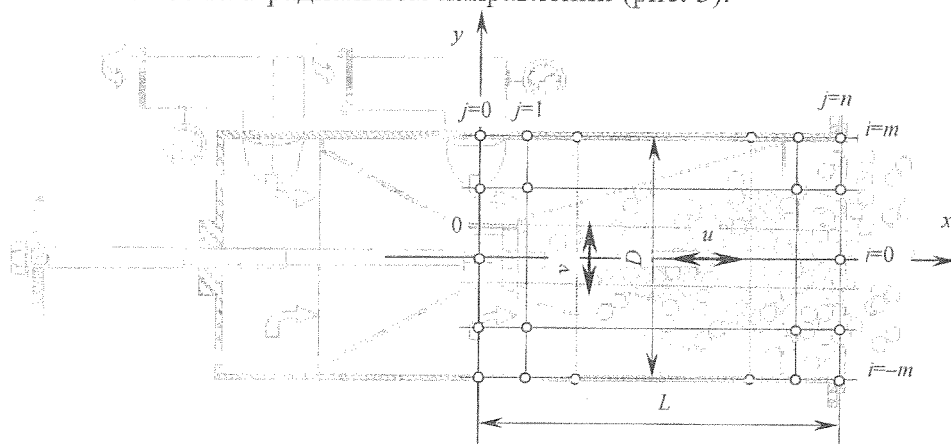


Рис. 3. Расчётная схема для моделирования работы ПВТ.

Перенос количества движения и массы раствора пенообразователя или азота моделируются уравнением обобщённого вида [9,10]:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho\Phi) + \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} = I, \quad (2)$$

где τ – время, с; ρ – плотность раствора пенообразователя или азота, кг/м^3 ;

$J_x = \rho u \Phi - \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x}$; $J_y = \rho v \Phi - \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial y}$ – суммарные конвективно-диффузионные потоки

массы или количества движения, размерность которых зависит от вида переносимой субстанции; Φ – физическая переменная (скорость и плотность азота или раствора пенообразователя, концентрация пенообразователя и т.д.); I – источник, размерность которого зависит от вида переносимой субстанции.

В частности, в двумерной постановке, на основании (2), при $\Gamma = \mu$ – динамической вязкости раствора пенообразователя, для составляющих скоростей его движения по x : $\Phi = u$ и по y : $\Phi = v$ получается система уравнений:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 - \mu \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v u - \mu \frac{\partial u}{\partial y}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + I_x; \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u v - \mu \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v^2 - \mu \frac{\partial v}{\partial y}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + I_y, \quad (4)$$

где ρ – плотность среды, кг/м^3 ; P – давление, Па ; I_x, I_y – источники тяги (движения).

При $\Gamma = 0$; $\Phi = 1$, и массовом источнике $I = I_m$ из (2) получается уравнение неразрывности (сплошности) потока пенообразователя:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho u v) = I_m. \quad (5)$$

Ввиду высокого напора источников подачи раствора пенообразователя и азота, длительность переходных процессов незначительна. Кроме того, нас интересует предельный, установившийся режим работы ПВТ, который он может обеспечить, в зависимости от качеств вспомогательных узлов, требуемых давления, концентрации раствора пенообразователя внутри корпуса и, соответственно, производительности и дальности подачи пены. Поэтому рассматривалась задача в стационарной постановке.

Особенностью моделирование плоского истечения кольцевой струи в наших условиях являются граничные условия на каркасе сетки, где продольные и поперечные составляющие скорости и градиенты давления равны 0:

$$u|_{x,y \in M} = v|_{x,y \in M} = \frac{\partial P}{\partial x}|_{y \in M} = \frac{\partial P}{\partial y}|_{x \in M} = 0, \quad (6)$$

где M – множество точек каркаса сетки, например, для вертикальной сетки это множество представляется отрезками прямой, параллельной оси Oy (между отрезками – свободное пространство ячеек сетки), а для наклонной – подобная прямая, но с углом наклона α по отношению к оси Ox . Условия (6) дополнялись стандартными условиями непроницаемости оболочки ПВТ [9] и заданными значениями скорости и градиента давления в местах подачи азота и раствора пенообразователя. Такая постановка граничных условий позволяет моделировать множество вариантов подачи газа и жидкости внутрь оболочки ПВТ (противонаправлено, сонаправлено, под углом) при различном расположении сетки в пределах объёма ПВТ и в зависимости от геометрических размеров пеногенератора и давления в его трубопроводной части.

Моделирование плоского течения раствора пенообразователя в объёме корпуса ПВТ производилось на основании системы представленных выше системы дифференциальных уравнений и граничных условий с помощью численного метода маркеров и ячеек (MAS) [9] и *simpler*-метода Патанкара [10]. В обоих методах используется шахматная (гибридная) сетка (рис.3). в основных узлах (i,j) вычисляется давление, а в фиктивных, отстоящих от основных на некотором расстоянии $\delta x/2$ и $\delta y/2$ – определяются продольная и поперечная составляющие скорости. В методе Патанкара профили скорости в пределах окрестности основных узлов представляются различными зависимостями от числа Рейнольдса (Пекле, Прандтля). В результате конвективно-диффузионные потоки заменяются конечно-разностными аналогами, например, вдоль продольной координаты:

$$J_x = B\Phi_i - A\Phi_{i+1}, \quad (7)$$

где I – номер узла сетки; Φ_I, Φ_{I+1} – значения физической переменной в соответствующих узлах; A и B – функции сечного числа Рейнольдса $Re = \frac{\rho_0 u_0 \delta x}{\mu_0}$; μ_0 – динамическая вязкость среды при нормальных условиях.

При линейной аппроксимации профиля скорости *simpler*-методом, конечно-разностный аналог уравнений движения совпадает с их конечно-разностным представлением по методу MAS. Однако вычисления поправок давления производились по *simpler*-методу, так как решение уравнения Пуассона для давления в MAS сопровождалось возникновением рециркуляционных потоков на границах расчётной области и отличалось медленной сходимостью. На рис. 4 представлены результаты моделирования профиля скорости (продольных скоростей) потока раствора пенообразователя на расчётной сетке, где для наглядности величины скорости отнесены к максимальным (на выходе из форсунки). В данном случае угол наклона сетки составлял примерно 30° .

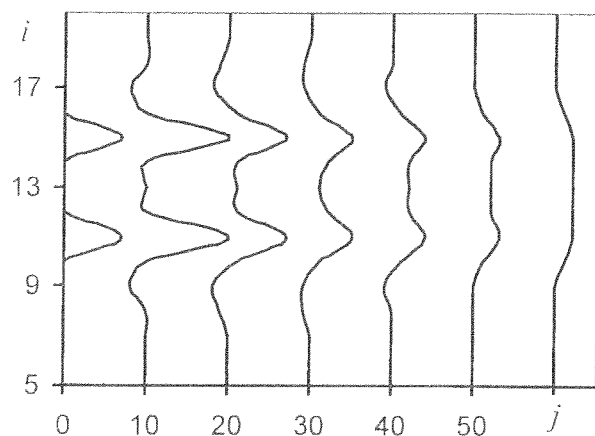


Рис. 4. Профиль скорости раствора пенообразователя.

Отчётливо просматривается наличие обратных токов у поверхности оболочки и внутри кольцевой струи. Постепенно, по мере продвижения потока это явление исчезает, сглаживаются пики скорости и, начиная с сечения 60, профиль скорости остаётся неизменным. Это позволяет прогнозировать оптимальные размеры ПВТ [11].

На рис. 5 представлены линии равных концентраций раствора пенообразователя. Для их построения, вычислялись поперечные скорости и модули скорости. По модулю скорости определялся ожидаемый расход пенообразователя в пределах каждой ячейки расчётной схемы и, соответственно, концентрация. Величины концентрации отнесены к максимальной (на выходе из форсунки), где она составляет 100 %. Изолинии строились для концентраций 10 ... 100 % с шагом 10 %. Полученное поле концентраций позволяет определять оптимальные точки расположения ячеек сетки и, следовательно, выбирать её необходимые размеры и форму.

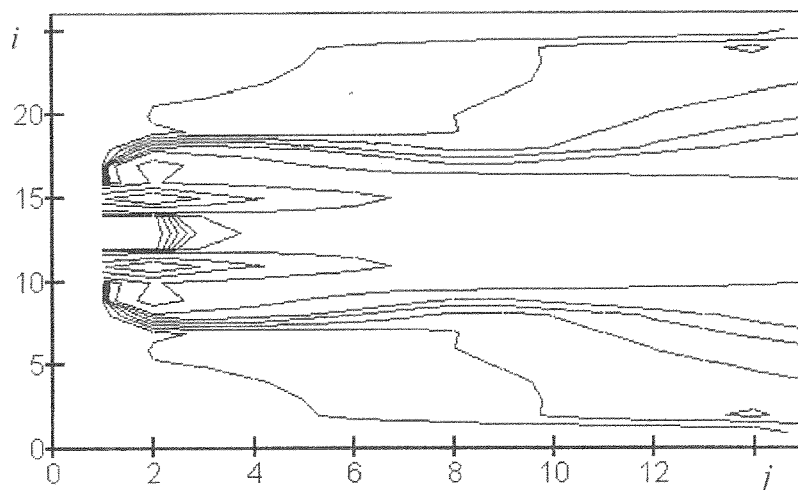


Рис. 5. Поле концентраций раствора пенообразователя в одном из вариантов прогноза

Разработанная на базе представленного численного метода расчёта компьютерная программа позволяет кроме полей скоростей и концентраций делать прогноз распределения давления внутри оболочки ПВТ и осуществлять проверку выполнения условий образования пены как по скорости, так и по давлению в любой точке объёма. Кроме того, если представленную расчётную схему связать со схемой соединений трубопроводной части, появится возможность моделирования работы ПВТ в комплексе с шахтным пожарно-оросительным трубопроводом.

Таким образом, построенная математическая модель и разработанная компьютерная программа позволяют моделировать процессы массопереноса внутри корпуса ПВТ с целью разработки оптимальной конструкции установки при заданных параметрах трубопроводной части и необходимой пенопроизводительности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пеногенератор высоконапорный трубный / П.С. Пашковский, Э.А. Попов, Д.И. Момот // Горноспасательное дело: Сб. науч. тр. / НИИГД. – Донецк, 2003. – С. 11-15.
2. Козлюк А.И. Противопожарная защита угольных шахт. – К.: Техніка, 1980. – 156 с.
3. Козлюк А.И., Засевский В.П. Влияние параметров термодинамического состояния газа и гидродинамики пенного потока на процесс пенообразования на сетках / ВНИИГД. – Донецк, 1986. – 4с. – Деп. в ЦНИЭИуголь 07.01.86, № 3594 ур.
4. 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.
5. Экспериментальное исследование зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от коэффициента живого сечения сеток и кратности воздушно-механической пены / В.П. Чарков, Г.М. Шецер, Ю.В. Первушин, В.П. Засевский, В.И. Романенко / ВНИИГД. – Донецк, 1976. – 6 с. – Библиогр.: 3 назв. – Деп. в ЦНИЭИуголь 10.04.76, № 591.
6. Автоматическое регулирование кратности пены / П.С. Пашковский, В.П. Засевский, М.А. Яремчук // Горноспасательное дело: Сб. науч. тр. / НИИГД. – Донецк, 2000. – С. 26-30.
7. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. – М., Энергия, 1976. – 296 с.
8. Канторович Б.В., Миткалинный В.И., Деягин Г.Н. Гидродинамика и теория горения потока топлива – М., Металлургия, 1971. – 488 с.

9. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980. – 616 с.

10. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкостей. – М. – Энергоатомиздат. – 1993. – 150 с.

11. Пат. 61615 А Україна; МПК7 А62С 5/02. Пристрій для одержання газомеханічної піни / П.С. Пашковський, Е.А. Попов, Д.І. Момот; НДІГС «Респіратор» (Україна). – №2 2003032316; Заявл. 18.03.2003; Опубл. 17.11.2003, Бюл. № 11.

УДК 614.84:628.174

*В.П.Ольшанський, д. ф.-м.н., професор (Академія цивільного захисту України),
С.В.Ольшанський (Національний технічний університет «ХПІ»)*

ПРО РОЗРАХУНОК ДАЛЬНОСТІ ПОДАЧІ ВОГНЕГАСНОЇ РІДИНИ КОМПАКТНИМ СТРУМЕНЕМ

Проведено огляд відомих і одержано нові формули для розрахунку траєкторії вільного гідралічного струменя. Вони дозволяють оперативно оцінювати дальність подачі вогнегасної рідини нахиленим струменем та встановлювати її залежність від параметрів витікання.

Актуальність теми. В пожежній справі для гасіння зовнішніх пожеж часто використовують суцільні рідинні струмені. При цьому їх головними характеристиками вважають довжину (горизонтальну протяжність) та об'ємні витрати (продуктивність) [1, 2]. Поряд з цими показниками заслуговує на увагу точність подачі рідини, що пов'язано з розрахунком траєкторії. Це один з резервів підвищення ефективності використання вогнегасних рідин, тобто зменшення їх витрат і скорочення часу гасіння пожежі. Тому бажано мати прості, але досить точні формули для розрахунку траєкторії струменя.

Аналіз існуючих досліджень і публікацій. У гідраліці, орієнтованій на потреби пожежної справи, традиційно розглядають емпіричні формули Люгера, Фрімана та Лобачова, які дозволяють розраховувати висоту вертикального струменя [3, 4, 5, 6]. Далі за допомогою відповідних таблиць коефіцієнтів ці результати поширюють на нахилені струмені і знаходять так звані радіуси дії та область зрощування. Але залишається невідомою залежність цих параметрів від кута нахилу вісі ствола до горизонту, що ускладнює практичне використання емпіричної теорії.

Враховуючи вказаний недолік, в роботах [5, 6] для розрахунку траєкторії стаціонарного струменя одержано вираз

$$y = x \operatorname{tg} \theta_0 - \frac{x^2}{4H \cos^2 \theta_0} \left(1 + \frac{K}{D_0} H \right). \quad (1)$$

У ньому (x, y) – поточні координати точок траєкторії у прямокутній системі координат xOy ; θ_0 – кут нахилу вісі ствола до горизонту; H – ефективний напір, з яким витікає струмінь з насадки діаметром D_0 ; K – коефіцієнт гідродинамічного опору потокові рідини.

Із залежності (1) випливає, що дальність польоту частинок рідини є максимальною при $\theta_0 = 45^\circ$ і становить