

УДК 614.842.615

DOI: 10.15587/2706-5448.2020.210375

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОЖИДКОСТНОГО ПОТОКА В СИСТЕМАХ ГЕНЕРИРОВАНИЯ КОМПРЕССИОННОЙ ПЕНЫ

Виноградов С. А., Шахов С. М., Кодрык А. И., Титенко А. Н., Пархомчук А. В.

Объектом исследования является система подачи компрессионной пены. Одним из самых проблемных мест при проектировке систем подачи компрессионной пены является необходимость получения определённого типа пены, обладающей необходимыми свойствами, в зависимости от класса пожара, для тушения которого она будет использована. Необходимо учитывать технологический процесс образования пены, а именно регулирование потока раствора пенообразователя и сжатого воздуха, которые подаются в камеру смешивания, где непосредственно происходит генерация пены. Важно обеспечить оптимальные параметры в зависимости от назначения установки выходящего потока пены: мощность потока, кратность пены и ее стойкость. С целью проектировки системы подачи компрессионной пены с определёнными технологическими параметрами необходимо предварительно получить эти параметры аналитически, для чего необходимо построить соответствующую математическую модель.

В ходе исследования использовались графическая среда имитационного моделирования Simulink (интегрированная в программную среду MatLab), которая позволяет с помощью отдельных блоков в виде направленных графов строить динамические модели. Структура такой модели построена на основе отдельных, самостоятельных блоков, которые сами по себе являются отдельными математическими моделями.

Новым является разработка математической модели двухфазного потока: жидкой фазы, состоящей из смеси воды с пенообразователем и газовой фазы – воздуха в тракте пеногенератора в составе блок-схемы установки для случая генерации компрессионной пены. А также разработка схемы и алгоритма коммуникации последовательно соединённых блоков общей блок-схемы. Благодаря этому обеспечивается получение расчётных выходных данных стационарного режима работы установки.

Разработанная в работе математическая модель позволяет решать следующие прикладные и научные задачи:

– проводить расчёты входных параметров установки, которые обеспечат требуемые выходные параметры: мощность потока, кратность, время непрерывной генерации, стойкость пены, определяемые назначением и особенностями применения установки в условиях тушения различных видов пожаров;

– исследовать влияние параметров пеногенерирующей вставки установки на кратность компрессионной пены.

Ключевые слова: огнетушащие свойства, компрессионная пена, тушение пожаров, блок пеногенератора, системы коммуникации между блоками.

1. Введение

При проектировке систем подачи компрессионной пены, основная проблема заключается в необходимости получения определённого типа пены, обладающей необходимыми свойствами, в зависимости от класса пожара, для тушения которого она будет использована. Необходимо учитывать технологический процесс образования пены, а именно регулирование потока раствора пенообразователя и сжатого воздуха, который подают в камеру смешивания, где непосредственно происходит генерация пены. Важно обеспечить оптимальные параметры в зависимости от назначения установки выходящего потока пены: мощность потока, кратность пены и стойкость её.

Исходя из [1, 2], разные производители предлагают системы подачи компрессионной пены, с разными схемам построения, концентрацией и типами пенообразователей, технологическими режимами – давлением, интенсивностью подачи компонентов, временем работы.

С целью проектировки системы подачи компрессионной пены с определёнными технологическими параметрами необходимо предварительно получить эти параметры аналитически, для чего необходимо построить соответствующую математическую модель. На сегодня общей тенденцией при проектировании различных конструкций, особенно сложных, построенных на внутренних взаимодействиях отдельных структурных единиц, – является разработка математической модели, предшествует конструктивным решением и часто является расчетной основой для них. Такая математическая модель разрешит аналитически получить оптимальные геометрические и технологические параметры системы для подачи компрессионной пены для конкретного случая ее применения при тушении пожара.

Применение компрессионной пены является новым способом пожаротушения. Поэтому количество научных работ, посвящено этой тематике значительно меньше по сравнению с другими направлениями пожаротушения. Наибольшее количество известных исследований посвящено использованию компрессионной пены для тушения жидких горючих веществ.

Так, в работе [3] оценивалась огнетушащая эффективность системы подачи компрессионной пены при различных соотношениях количества сжатого воздуха и водного раствора пенообразователя для тушения пожаров жидких горючих веществ с использованием пленкообразующего пенообразователя AFFF 3 %. Экспериментально установлено, что соотношение 1:7 при одинаковых условиях является наиболее эффективным. Однако в работе не было разработано математической модели установки.

В исследовании [4] сравнивалась эффективность тушения пожаров жидких горючих веществ с использованием пенообразователей класса А (смачиватели) и AFFF (пленкообразующие). Применялись системы компрессионной и воздушно-механической пены. Концентрация пенообразователя класса А в растворе с водой составляла 0,6 %, а AFFF – 1,5 %, 2 %, 3 %. Исследования

показали, что при тушении условного пожара с применением CAFS (compressed air foam system) время в 1,7–2,4 раза меньше, в сравнение с воздушно-механической пеной для различных концентраций пенообразователя.

В работе [5] исследовалось влияние концентрации пенообразователя на эффективность тушения модельных очагов пожаров твердых и жидких горючих веществ компрессионной пеной, где концентрации изменялись от 1,2 % до 12 %. Испытания показали, что снижение концентрации пенообразователя с 12 % до 2,2 % уменьшало время тушения более, чем в 2 раза. При дальнейшем снижении концентрации пена теряла свои огнетушащие свойства, и время тушения повышалось на 1,2 % и составляло 39 с. Однако в этих исследованиях не найдено оптимальной концентрации пенообразователя в растворе с водой и не ставилась цель разработки математической модели установки подачи компрессионной пены.

В работе [6] изучено влияние типа пенных пузырьков системы CAFS на время тушения пожара. Как источник возгорания использовали бензин. Концентрация пенообразователя менялась от 0,4 % до 1 %, скорость подачи раствора пенообразователя – от 0,35 м³/ч до 1,7 м³/ч, а скорость подачи сжатого воздуха – от 2,2 г/с до 2,7 г/с. Выделены три типа пенных пузырьков: мокрые, средние и сухие. При этом самое низкое время тушения наблюдалось при применении сухой пены. Авторами не было выполнено никаких математических моделирований работы установки.

В исследовании [7] проведено сравнение эффективности тушения пожаров твердых горючих веществ компрессионной и воздушно-механической пеной низкой кратности. Результаты показали, что на тушение условного очага пожара компрессионной пеной необходимо вдвое меньше воды и вдвое меньше времени.

Автором работы [8] проведены экспериментальные исследования, в результате чего получены данные по значениям токов утечки по струе компрессионной пены для различных показателей от ствола к мишени, при различных значениях напряжения и показателей кратности. Результаты были обработаны с помощью метода множественной регрессии и получены зависимости, которые применены для разработки программного обеспечения по определению возможности безопасного применения компрессионной пены для тушения электрооборудования под напряжением. Однако в работе не рассматривался вопрос моделирования работы установки для подачи компрессионной пены.

В работе [9] исследователи определили, что потери давления в рукавной линии при подаче пены на высоту зависят от кратности пены и давления в рукавной линии. Это было подтверждено исследованием [10], которое показало, что при кратности пены 8,5 потери давления составляют 0,05 МПа на каждые 10 м высоты при высоте подъема пены до 250 м и давления на насосе в 1,23 МПа. Таким образом, по сравнению с воздушно-механической пеной потери давления в рукаве уменьшаются вдвое. Особенности работы и параметров установки для генерации компрессионной пены авторами не рассматривались.

Ряд исследований было направлено на поиск оптимальных способов смешивания компонентов в системе подачи компрессионной пены. Так, в работах [7, 11]

проанализированы существующие способы ввода воздуха в камеру смешивания CAFS. Среди основных конструктивных решений определены два наиболее распространенных способа: вертикальное и коаксиальное газожидкостное смешивание. Экспериментальным способом определен более эффективный способ введения воздуха в камеру. Результаты показали, что пена, которая образована с помощью коаксиального (соосного) способа смешивания, обладает более эффективными огнетушащими свойствами, чем пена, образованная путем вертикального введения воздуха в камеру смешивания. Однако математического моделирования работы камеры смешивания в установке для генерации компрессионной пены авторами не проведено.

Как видно из выше проанализированных источников, большая часть исследований, посвященных системе подачи компрессионной пены, ориентирована, в основном, на экспериментальное определение эффективности применения компрессионной пены для тушения пожаров различных веществ, при использовании установок для генерации компрессионной пены с различными параметрами. Поэтому важной и нерешенной частью проблемы совершенствования установок для генерации компрессионной пены является разработка математического аппарата, описывающего их работу.

В работе [12] проведено моделирование работы отдельных блоков установки для генерации пены: блока подачи газа, блока подачи смеси воды и пенообразователя и блока движения пены в рукаве. С целью обеспечения функционирования общей блок-схемы процесса генерации компрессионной пены для дальнейшей проектировки установок, необходимо добавление математических моделей двух блоков, которые рассматриваются в данной работе. Объединение данных блоков с блоками из [12] позволит выполнить общую задачу математического моделирования процесса генерирования компрессионной пены.

Таким образом, объектом исследования выбрана система для подачи компрессионной пены. *Целью работы* является построение следующих блоков математической модели процесса генерации компрессионной пены: блока пеногенератора и системы коммуникации между блоками.

2. Методы проведения исследования

Входными данными блока пеногенератора, где реализуется математическая модель прохождения газожидкостной смеси через пеногенератор, являются:

- p_2 – давление на входе пеногенерирующей вставки, Па;
- p_1 – давление на выходе пеногенерирующей вставки, Па;
- ε – порозность (отношение объема пустот к общему объему пористого вещества) пористого тела;
- D – диаметр пеногенерирующей вставки, м;
- L – длина пеногенерирующей вставки, м;
- h_s – толщина пеногенерирующих элементов, м;
- b_s – ширина пеногенерирующих элементов, м.

Выходными данными являются:

– Q_w – поток жидкой фазы газожидкостного потока (объемного расхода) в предкамеру, $\text{м}^3/\text{с}$;

– Q_a – поток газовой фазы газожидкостного потока Q_a (объемного расхода) в предкамеру, $\text{м}^3/\text{с}$.

Сделано допущение, исходя из физики процессов, при котором пеногенерирующая вставка рассматривается как осесимметричное пористое тело с одномерным течением газожидкостного потока. Простейшей моделью газожидкостного потока является квазимогенная модель. Тогда величина падения давления по длине канала пеногенерирующей вставки для газожидкостной смеси согласно [13]:

$$\frac{dp}{dL} = \psi \cdot \lambda(p) \cdot \rho_w \cdot \frac{\omega'^2}{d_{equ}} \cdot \left(1 + \left(1 - \frac{\rho_{air}(p)}{\rho_w} \right) \cdot \frac{\omega''}{\omega'} \right), \text{ Па/м}, \quad (1)$$

где ψ – приведенный коэффициент сопротивления для принятых режимов газосодержания, который уточняется экспериментальным путём;

$\lambda(p)$ – коэффициент гидродинамического сопротивления однофазного потока, в данном случае жидкой фазы, движущейся с приведенной скоростью жидкой фазы;

ρ_w – плотность жидкой фазы, $\text{кг}/\text{м}^3$;

d_{equ} – эквивалентный диаметр канала пеногенерирующей вставки, м;

$\rho_{air}(p)$ – плотность газовой фазы, которая находится под давлением p , $\text{кг}/\text{м}^3$;

ω' – приведенная скорость жидкой фазы, $\text{м}/\text{с}$;

ω – приведенная скорость газовой фазы, $\text{м}/\text{с}$.

На основе определения понятия кратности пены, определим величину объемного потока газовой фазы:

$$Q_{a_NC} = (k_m - 1) \cdot Q_w, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2)$$

где Q_{a_NC} – объемный поток газовой фазы (для нормальных условий), $\text{м}^3/\text{с}$;

Q_w – объемный поток жидкой фазы (смеси воды с пенообразователем), $\text{м}^3/\text{с}$.

При определении $Q_a(p)$ – объемного расхода воздуха, который находится в условиях давления p , важно заметить, что во время прохождения потока через этот блок имеет место очень активное перемешивание и контакта обеих фаз, формирующие газожидкостную смесь. Вследствие более значительного массового расхода воды (при обычных значениях кратности), успевает произойти обмен тепла между отдельными фазами, поэтому данный процесс считаем изотермическим термодинамическим процессом, для которого, согласно закону Бойля-Мариотта, объемный расход вычисляется по формуле:

$$Q_a(p) = Q_{a_NC} \cdot \frac{P_{NC}}{p}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (3)$$

где $Q_a(p)$ – объемный поток газовой фазы в условиях давления p , $\text{м}^3/\text{с}$;

p_{NC} – нормальное атмосферное давление, Па;

p – давление, под которым находится пена в текущий момент времени, Па;

Объёмный поток газожидкостной смеси, находящейся под давлением p , определяем по формуле:

$$Q_f(p) = Q_a + Q_w, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (4)$$

Для вычисления массового расхода газа с использованием формулы (2) воспользуемся формулой:

$$G_a = Q_{a_NC} \cdot \rho_{a_NC} = (k_m - 1) \cdot Q_w \cdot \rho_{a_NC}, \text{ кг/с}. \quad (5)$$

Находим формулу плотности газовой фазы, которая находится в условиях давления, используя формулы (2), (3), (5):

$$\rho_{air}(p) = \frac{G_a}{Q_a(p)} = \frac{(k_m - 1) \cdot Q_w \cdot \rho_w \cdot \frac{\rho_{a_NC}}{\rho_w}}{(k_m - 1) \cdot Q_w \cdot \frac{p_{NC}}{p}} = \frac{\rho_{a_NC}}{p_{NC}} \cdot p, \text{ кг/м}^3. \quad (6)$$

Так как пеногенерирующая вставка имеет пористую структуру, то для описания физических процессов, имеющих место в пористой структуре, согласно методике [14], необходимо найти:

- фиктивную скорость газожидкостного потока;
- действительную скорость газожидкостного потока;
- порозность пеногенерирующей вставки;
- суммарную площадь поверхности элементов пеногенерирующей вставки;
- удельную поверхность элементов пеногенерирующей вставки;
- эквивалентный диаметр канала пеногенерирующей вставки.

Величины фиктивных приведенных скоростей жидкостной ω'_{im} и газовой фазы ω_{im} , отнесенных ко всей площади поперечного сечения пеногенерирующей, находим по формуле [13]:

$$\omega' = \frac{4 \cdot Q_w}{\pi \cdot D^2}, \omega'' = \frac{4 \cdot Q_a(p)}{\pi \cdot D^2}, \text{ м/с}, \quad (7)$$

где $Q_a(p)$ – объёмный расход газовой фазы газожидкостного потока, который находится в условиях давления p и определяется по формуле (3), $\text{м}^3/\text{с}$;

Q_w – объёмный расход жидкой фазы газожидкостного потока, $\text{м}^3/\text{с}$;

D – внутренний диаметр полости пеногенератора, м.

Тогда, согласно [13], получим действительные скорости жидкостной ω' и газовой фазы ω'' газожидкостного потока:

$$\omega' = \frac{\omega'_{in}}{\varepsilon}, \omega'' = \frac{\omega''_{in}}{\varepsilon}, \text{ м/с.} \quad (8)$$

Порозность ε определяем по формуле:

$$\varepsilon = \frac{V_G \cdot \rho_{Fe} - m}{V_G \cdot \rho_{Fe}}, \quad (9)$$

где m – масса элементов, из которых состоит пористое тело пеногенерирующей вставки, кг;

V_G – внутренний объем полости пеногенератора, м³;

$\rho_{Fe}=7,8$ – плотность материала элементов, из которых состоит пористое тело пеногенерирующей вставки, кг/м³.

Объем этих элементов вычислим по формуле:

$$V_{wire} = V_G \cdot (1 - \varepsilon), \text{ м}^3. \quad (10)$$

Тогда их суммарную длину получим по формуле:

$$L_s = \frac{V_{wire}}{h_s \cdot b_s}, \text{ м.} \quad (11)$$

Объем полости пеногенератора, в которой помещаются элементы пеногенерирующей вставки, который в данном случае имеет форму цилиндра, получим по формуле:

$$V_G = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L, \text{ м}^3. \quad (12)$$

Тогда суммарную площадь поверхности элементов пеногенерирующей вставки с подстановкой значений по формулам: V_{wire} – (10), L_s – (11), V_G – (12), определяется по формуле:

$$S_{wire} = 2 \cdot (h_s + b_s) \cdot L_s = \frac{\pi \cdot (h_s + b_s)}{2 \cdot h_s \cdot b_s} \cdot D^2 \cdot L \cdot (1 - \varepsilon), \text{ м}^2. \quad (13)$$

Удельную поверхность элементов пеногенерирующей вставки определяем по формуле:

$$P = \frac{S_{wire}}{V_G}, \text{ м}^2/\text{м}^3. \quad (14)$$

Эквивалентный диаметр канала пеногенерирующей вставки определяем по формуле [14]:

$$d_{equ} = \frac{4 \cdot \varepsilon}{\Pi}, \text{ м.} \quad (15)$$

Для расчета коэффициента гидравлического сопротивления $\lambda(p)$, входящего в формулу (1) согласно методике [13], надо найти расходную скорость двухфазного потока:

$$\omega = \omega' + \frac{\rho_{air}(p)}{\rho_w} \omega'', \text{ м/с.} \quad (16)$$

Тогда, коэффициент гидравлического сопротивления $\lambda(p)$ рассчитывается как коэффициент гидродинамического сопротивления однофазного потока, в данном случае, жидкой фазы. Для этого необходимо найти число Рейнольдса для жидкой фазы как функцию давления:

$$Re(p) = \frac{\omega(p) \cdot d_{equ} \cdot \rho_w}{\mu_w}, \quad (17)$$

где μ_w – динамическая вязкость пенообразователя с водой, Па·с.

Подставив числовые значения переменных и значения функции при типичных режимах пеногенерации, получим, что число $Re < 4000$. Этот режим течения, согласно [15], соответствует закону Гагена-Пуазейля. Тогда величина гидродинамического сопротивления $\lambda(p)$ вычисляется по формуле:

$$\lambda(p) = \frac{64}{Re(p)}. \quad (18)$$

Для вычисления объемного газосодержания газожидкостного потока, рассматривая его как функцию давления, воспользуемся методикой [13] и, сделав подстановки $Q_a(p)$ – согласно (4), $Q_f(p)$ – согласно (3), Q_{a_NC} – согласно (2), сделав алгебраические преобразования, получим:

$$\phi(p) = \frac{Q_a(p)}{Q_f(p)} = \frac{Q_{a_NC} \cdot \frac{P_{NC}}{p}}{Q_{a_NC} \cdot \frac{P_{NC}}{p} + Q_w} = \frac{(k_m - 1) \cdot P_{NC}}{k_m \cdot P_{NC} + p - P_{NC}}. \quad (19)$$

Подставив в формулу (1) результаты вычислений величин: $\lambda(p)$ – согласно (18) и ω'' и ω' – согласно (8), d_{equ} – согласно (15). Сделав алгебраические преобразования, получим дифференциальное уравнение для градиента давления вдоль оси пеногенератора:

$$\frac{dp}{dL} = \frac{128 \cdot \mu_w \cdot Q_w}{\pi \cdot D^2 \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2}} \cdot \frac{\frac{P_{NC} \cdot (k_m - 1) - \rho_{a_NC} \cdot (k_m - 1) + 1}{P} \cdot \frac{\rho_w}{\rho_w}}{\left(\frac{2 \cdot h_s \cdot b_s}{h_s + b_s}\right) \cdot \left(1 + \frac{\rho_{a_NC} \cdot (k_m - 1)}{\rho_w}\right)}, \text{ Па/м.} \quad (20)$$

Решая это уравнение методом разделения переменных, получим интеграл величины объемного расхода жидкой фазы в зависимости от входного p_2 и выходного p_1 давления:

$$Q_w = \frac{\pi \cdot D^2}{128 \cdot \mu_w \cdot \psi \cdot L} \cdot \left(\frac{2 \cdot h_s \cdot b_s}{h_s + b_s}\right)^2 \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \cdot \int_{p_1}^{p_2} \frac{1 + \frac{\rho_{a_NC} \cdot (k_m - 1)}{\rho_w}}{\frac{P_{NC} \cdot (k_m - 1) - \rho_{a_NC} \cdot (k_m - 1) + 1}{P} \cdot \frac{\rho_w}{\rho_w}} dp, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (21)$$

Вычислив этот интеграл, сделав алгебраические упрощения и для уменьшения громоздкости, введя вспомогательные переменные a , b , получим совокупность формул для вычисления объемной величины расхода жидкой фазы:

$$a = \frac{(k_m - 1) \cdot \rho_{a_NC}}{\rho_w} - 1;$$

$$b = (k_m - 1) \cdot p_{NC}; \quad (22)$$

$$Q_w = \frac{\pi \cdot \left(1 + \frac{\rho_{a_NC} \cdot (k_m - 1)}{\rho_w}\right)}{32 \cdot \mu_w \cdot \psi} \cdot \left(\frac{2 \cdot h_s \cdot b_s}{h_s + b_s}\right)^2 \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \cdot \frac{D^2}{L} \times$$

$$\times \frac{b \cdot \ln\left(\frac{b - p_1 \cdot a}{b - p_2 \cdot a}\right) + p_1 \cdot a - p_2 \cdot a}{a^2}, \text{ м}^3/\text{с}.$$

Используя уравнения (2), используя те же вспомогательные переменные a , b , получим формулу для объемного расхода газовой фазы:

$$Q_{a_NC} = \frac{\pi \cdot \left(1 + \frac{\rho_{a_NC} \cdot (k_m - 1)}{\rho_w}\right)}{32 \cdot \mu_w \cdot \psi} \cdot \left(\frac{2 \cdot h_s \cdot b_s}{h_s + b_s}\right)^2 \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \cdot \frac{D^2}{L} \times$$

$$\times \frac{b \cdot \ln\left(\frac{b - p_1 \cdot a}{b - p_2 \cdot a}\right) + p_1 \cdot a - p_2 \cdot a}{a^2} \cdot (k_m - 1), \text{ м}^3/\text{с}. \quad (23)$$

Получен алгоритм вычисления объемных расходов газовой и жидкой фазы газожидкостной смеси, исходя из входных величин и принятых параметров блока, моделирующего работу пеногенератора:

$$\begin{aligned} Q_w &= Q_w(p_2, p_1, k_m, D, L, h_s, b_s, \varepsilon, \mu_w), \\ Q_a &= Q_a(p_2, p_1, k_m, D, L, h_s, b_s, \varepsilon, \mu_w), \end{aligned} \quad \text{м}^3/\text{с}. \quad (24)$$

Для проведения расчетов с помощью разработанной математической модели, с учетом переходных процессов и контроля ошибки, необходимо задавать входные параметры. Они задаются произвольно и, для получения желаемых выходных параметров установки, подбираются путем итераций.

3. Результаты исследований и обсуждение

Основными блоками блок-схемы математической модели потоков установки для генерации компрессионной пены (рис. 1) являются:

- два блока, коммутирующих в общей схеме параллельно, это блоки «Liquid» и «Air»;
- три блока, коммутирующих в общей схеме последовательно, это блоки «Generator» и «Pipe», «Pistol».

Если для симуляции двух блоков с параллельной коммуникацией трудностей не возникает, то для обеспечения симуляции блоков, соединённых последовательно, необходима разработка системы коммуникации между ними. Задача этой системы заключается в том, чтобы обеспечить во время симуляции и в ее результате выравнивание величин потоков обоих блоков, тем самым обеспечивая закон сохранения массы по всему тракту установки.

Принцип построения такой системы (рис. 2) использует вспомогательные элементарные блоки с «Simulink Library», а именно: «Math Operations», «Gain», «Integrator», «Sum».

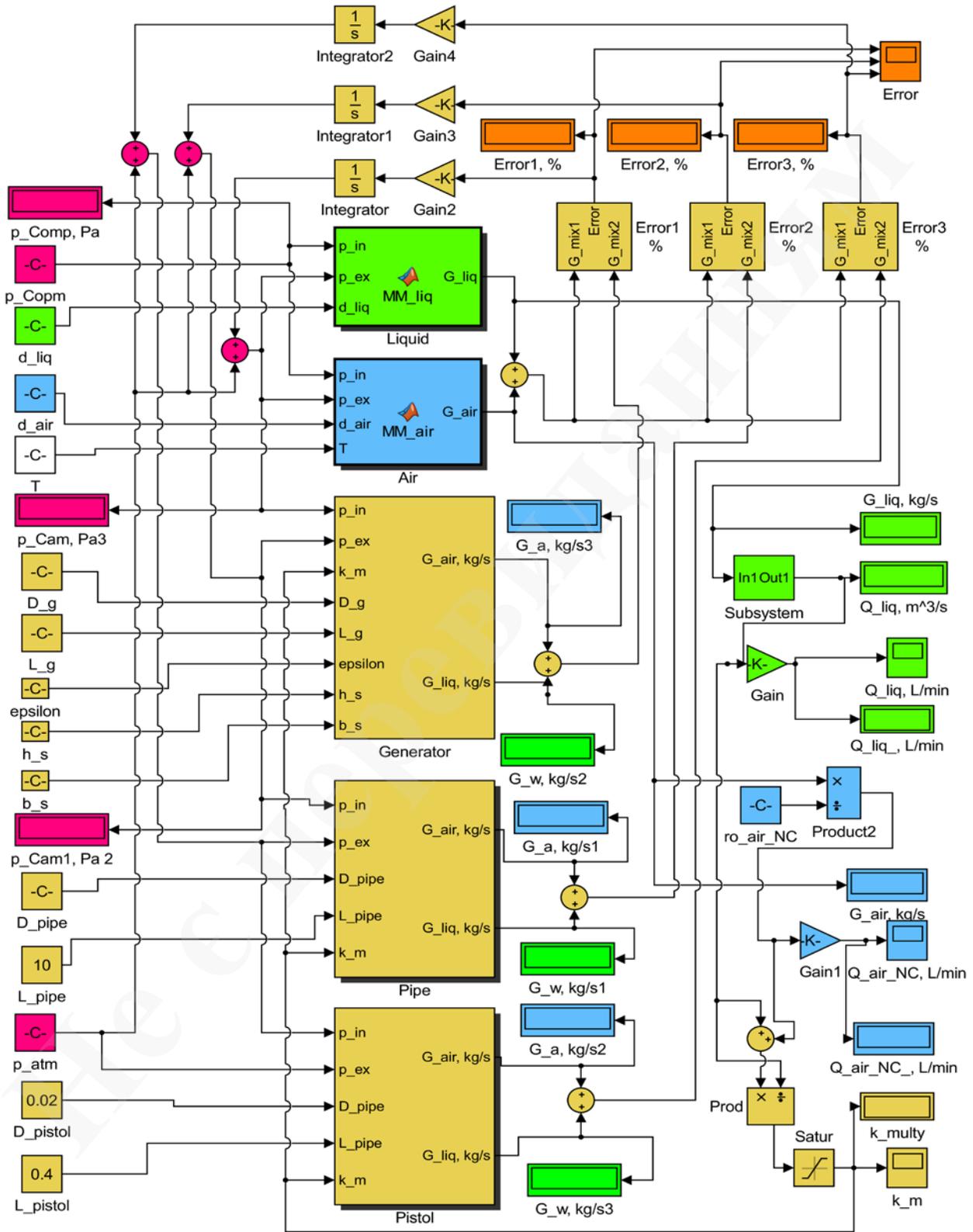


Рис. 1. Блок-схема математической модели потоков, имеющих место в установках по генерации компрессионной пены

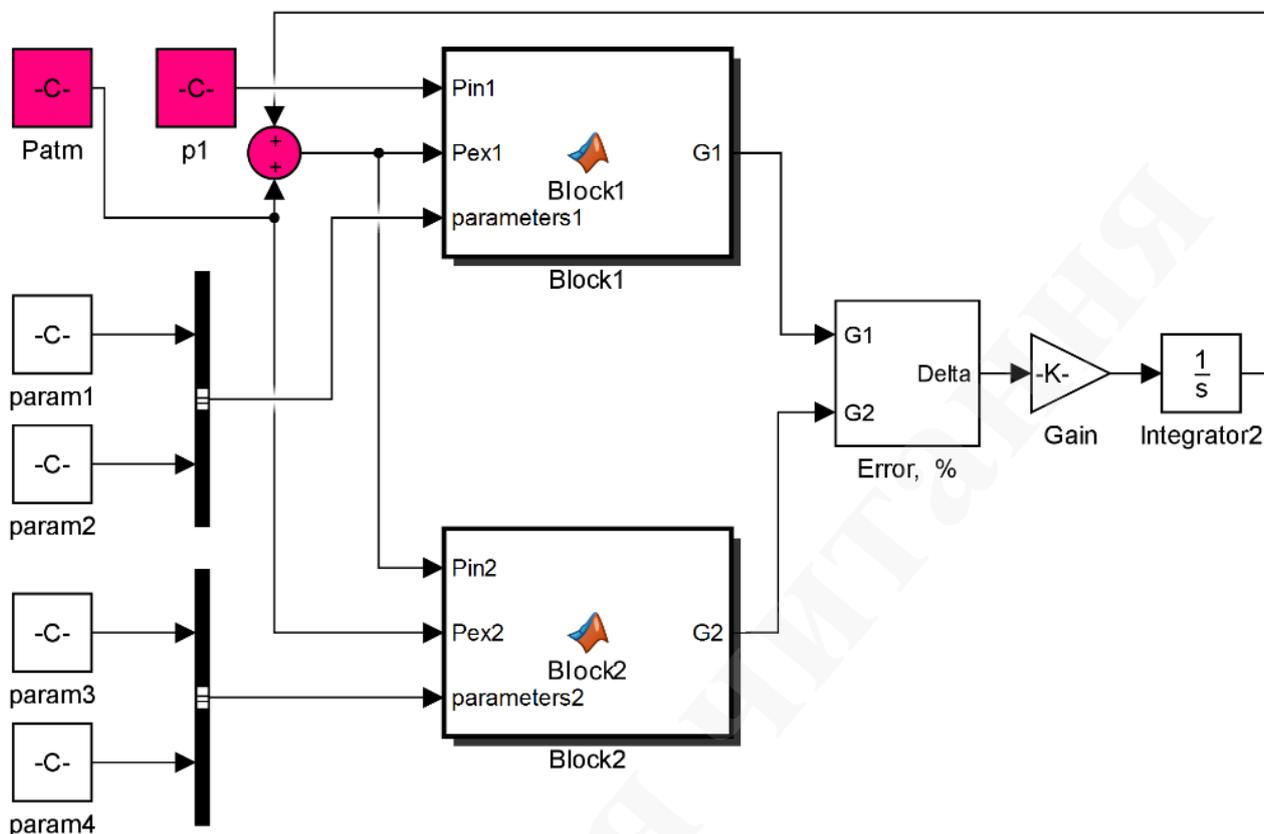


Рис. 2. Схема структуры коммуникации блоков, имеющих последовательное соединение

Входные параметры:

– p_{in1} (p_{in2}) – входное давление, Па, – величина, которая не меняется во время симуляции;

– p_{ex1} (p_{ex2}) – выходное давление, Па, – величина, которая меняется во время симуляции;

– parameters1 (parameters2) – величины, которые не меняются во время симуляции;

– $G1$ ($G2$) – поток газожидкостной смеси, кг/с, – величина, которая вычисляется в этом блоке.

Такая структура при симуляции должна минимизировать абсолютную величину разницы между потоками обоих блоков. Для подтверждения этого напишем уравнение:

$$\delta(t) = G_1 \cdot \left(p_{in1} \cdot \int_0^t \delta(t) \cdot k \cdot dt + p_{atm} \right) - G_2 \cdot \left(\int_0^t \delta(t) \cdot k \cdot dt + p_{atm} \cdot p_{atm} \right), \text{ м}^3/\text{с}, \quad (25)$$

где $\delta(t)$ – целевая функция, выбранная для оценки величины разницы между потоками обоих блоков;

G_1 , G_2 – функции, выражающие зависимость потока i -го блока от его входных данных, например, по формулам (21), (22), $\text{м}^3/\text{с}$;

p_{in1} – входное давление первого блока «Block1», Па;

$\int_0^T \delta(t) \cdot k \cdot dt$ – выходное давление первого блока «Block1» и, согласно схеме

на рис. 2, входное давление второго блока «Block2», Па;

k – постоянная, выбираемая исходя из оптимизации машинного времени компьютера;

$0..T$ – временной интервал моделирования, выбираемый, исходя из оптимизации машинного времени компьютера, с;

p_{atm} – атмосферное давление.

В качестве целевой функции $\delta(t)$ выбрана следующая:

$$\delta(t) = \frac{G_2(p_{in2}, p_{ex2}) - G_1(p_{in1}, p_{ex1})}{\frac{G_2(p_{in2}, p_{ex2})}{2} + \frac{G_1(p_{in1}, p_{ex1})}{2}}. \quad (26)$$

Окончательный расчет кратности пены в программе осуществляется по формуле (27), как отношение потока смеси воды с пенообразователем G_w к потоку газожидкостной смеси G_{jet} .

$$k_m = \frac{G_w}{G_{jet}}. \quad (27)$$

Созданная математическая модель позволяет рассчитывать эти величины в течение определенного времени, поэтому эта формула получена из известного уравнения для кратности пены:

$$k_m = \frac{V_f}{V_w + V_c}, \quad (28)$$

благодаря уравнениям (29) и (30):

$$V_f = G_{jet} \cdot t, \text{ м}^3, \quad (29)$$

$$V_w + V_c = G_w \cdot t, \text{ м}^3, \quad (30)$$

где V_f – объем пены, л; V_w – объем воды, л; V_c – объем пенообразователя, л; G_{jet} – расход смеси, л/с (воздух + раствор пенообразователя); G_w – расход жидкости, л/с, (вода + раствор пенообразователя).

Функционирование блок-схемы математической модели процесса генерации компрессионной пены в системе. Блок-схема математической модели процесса генерации компрессионной пены представлена на рис. 1.

Входные данные:

– «p_compr» – давление на выходе компрессора, Па;

– «d_liq» – критический диаметр жидкостного сопла, м;

- «d_{air}» – критический диаметр газового сопла, м;
- «T» – температура окружающей среды, К;
- «D_g» – диаметр пеногенерирующей вставки, м;
- «L_g» – длина пеногенерирующей вставки, м;
- «epsilon» – порозность пористого тела;
- «h_s» – толщина пеногенерирующих элементов, м;
- «b_s» – ширина пеногенерирующих элементов, м;
- «D_{pipe}» – внутренний диаметр трубопровода, м;
- «L_{Pipe}» – длина трубопровода, м;
- «D_{pistol}» – внутренний диаметр канала пистолета-переключателя, м;
- «L_{pistol}» – длина канала пистолета переключателя, м;
- «p_{atm}» – нормальное атмосферное давление, Па.

Выходными данными являются:

- «Q_{liq}» – поток жидкой фазы газожидкостного потока (объемного расхода), м³/с;
- «Q_{air}» – поток газовой фазы газожидкостного потока (объемного расхода для н. у.), м³/с;
- «k_m» – кратность пены;
- «Error1», «Error2», «Error3» – относительные ошибки расхода для трех блоков: «Generator», «Pipe», «Pistol».

Начальные условия для переменных величин:

- $p_{in}=0,1$ МПа, входное давление блоков «Generator», «Pipe», «Pistol»;
- $p_{ex}=0,1$ МПа, выходное давление блоков «Generator», «Pipe», «Pistol».

В результате симуляции происходит асимптотическое приближение выходных данных («Q_{liq}», «Q_{air}», «k_m») и переменных величин входных и выходных давлений («p_{in}», «p_{ex}») блоков «Generator», «Pipe», «Pistol». Полученные значения соответствуют стационарному режиму работы установки для генерации компрессионной пены.

4. Выводы

В работе показано, что наиболее важным результатом разработки математической модели процесса генерации компрессионной пены является возможность проведения технического расчета ее параметров с учетом назначения установок.

Новым является разработка математической модели двухфазного потока: жидкой фазы, состоящей их смеси воды с пенообразователем и газовой фазы – воздуха в тракте пеногенератора в составе блок-схемы установки для случая генерации компрессионной пены. А также разработка схемы и алгоритма коммуникации последовательно соединённых блоков общей блок-схемы, обеспечивающей получение расчётных выходных стационарного режима работы установки.

Разработанная в работе математическая модель позволяет решать следующие прикладные и научные задачи:

- проводить расчеты входных параметров установки, которые обеспечат требуемые выходные параметры: мощность потока, кратность, время непрерывной

генерації, стійкість пени, визначені призначенням і особливостями застосування установки в умовах тушення різних видів пожег;

– дослідити вплив параметрів пеногенеруючої вставки установки на кратність компресійної пени.

Література

1. *One seven – technology*. Available at: <https://www.oneseven.com/technologie?lang=en>
2. *Compressed Air Foam Systems*. Neal Brooks. Available at: <http://compressedairfoamsystem.com>
3. Rie, D.-H., Lee, J.-W., Kim, S. (2016). Class B Fire-Extinguishing Performance Evaluation of a Compressed Air Foam System at Different Air-to-Aqueous Foam Solution Mixing Ratios. *Applied Sciences*, 6 (7), 191. doi: <http://doi.org/10.3390/app6070191>
4. Crampton, G., Kim, A. (2004). *Comprasion of the Fire Suppression Performance of Compressed – Air Foam with Air Aspirated and Unexpanded Foam Water Sopution*. Research Report No. 147, 1–25.
5. Wang, X., Liao, Y., Lin, L. (2009). Experimental study on fire extinguishing with a newly prepared multi-component compressed air foam. *Science Bulletin*, 54 (3), 492–496. doi: <http://doi.org/10.1007/s11434-008-0571-3>
6. Cheng, J., Xu, M. (2014). Experimental Research of Integrated Compressed Air Foam System of Fixed (ICAF) for Liquid Fuel. *Procedia Engineering*, 71, 44–56. doi: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.04.007>
7. Kamliuk, A. N., Navrotskii, O. D., Grachulin, A. V. (2017). Tusheniia pozharov penogeneririuschimi sistemami so szhatym vozdukhom. *Vestnik Universiteta grazhdanskoi zaschity MCHS Belarusi*, 1 (1), 44–53.
8. Fadiaev, V. D. (2017). *Primenenie kompressionnoi peny v nasosno – rukavnykh sistemakh pri tushenii pozharov elektrooborudovaniia pod napriazhenim*. Moscow, 158.
9. William, L., San, J. (2001). *Properties of compressed air foam*. County Fire District No. 3. Friday Harbour. Washington.
10. Grady, C., Lafferty, R. (2005). How high can you pump wildland firefighting foam? *Foam applications for wildland and urban fire management*, 1 (1).
11. Feng, D. (2013). Analysis on Influencing Factors of the Gas-liquid Mixing Effect of Compressed Air Foam Systems. *Procedia Engineering*, 52, 105–111. doi: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.113>
12. Shakhov, S. M., Vynogradov, S. A., Kodryk, A. I., Titenko, O. M., Stylyk, I. H. (2020). Matematychnе zabezpechennia dlia proektuvannia system heneruvannia kompresiinoi piny. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*, 3 (30), 103–106.
13. Kutateladze, S. S., Styrkovich, M. A. (1976). *Gidrodinamika gazozhidkostnykh sistem*. Moscow: Energiia, 143.
14. Planovskii, A. N., Ramm, V. M., Kagan, S. Z. (1961). *Protsessy i apparaty khimicheskoi tekhnologii*. Moscow: Gostoptekhizdat, 848.
15. Idelchik, I. E.; Shteinberga, M. O. (Red.) (1992). *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniiam*. Moscow: Mashinostroenie, 672.