

Министерство по чрезвычайным ситуациям  
Республики Беларусь

# **ЧРЕЗВЫЧАЙНЫЕ СИТУАЦИИ: ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ И ЛИКВИДАЦИЯ**

**Материалы**

***VIII Международной научно-практической конференции  
посвященной 20-летию органов и подразделений по  
чрезвычайным ситуациям  
«Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация»***

Минск  
2019

УДК 614.84

Рекомендовано Научно-техническим советом  
учреждения «Научно-исследовательский институт  
пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций»  
МЧС Республики Беларусь

Редакционная коллегия:  
к.т.н. Ю.С. Иванов (*научный редактор*),  
к.т.н. О.Е. Игнашева (*ученый секретарь*),  
к.т.н. А.И. Кицак, к.т.н. А.Н. Скрипко, к.т.н. Д.А. Кобяк,  
С.М. Малашенко

**Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация:** материалы VIII Международной научно-практической конференции посвященной 20-летию органов и подразделений по чрезвычайным ситуациям «Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация» / редкол.: Ю.С. Иванов [и др.]. – Мн.: УП «Промбытсервис», 2013. – 230 с.

**УДК 614.84**

ОБСТАНОВКА С ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМИ СИТУАЦИЯМИ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ЗА ПЕРВОЕ ПОЛУГОДИЕ 2019 г.....	19
Копылов Н.П., Кузнецов А.Е., Сушкина Е.Ю., Новикова В.И.	
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВИАЦИОННОГО СПОСОБА ТУШЕНИЯ ЛАНДШАФТНЫХ ПОЖАРОВ.....	19
Кузнецов М.В., Сафонов А.В.	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ СТЕКЛОВОЛОКНИСТЫХ ТКАНЫХ КАТАЛИТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРА, А ТАКЖЕ ИХ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ.....	19
Курмашов А.Н.	
НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИЛ ОВД, ВНУТРЕННИХ ВОЙСК И МЧС В ХОДЕ ЛИКВИДАЦИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИИ СОЦИАЛЬНОГО ХАРАКТЕРА ПРЕСЕЧЕНИЯ МАССОВЫХ БЕСПОРЯДКОВ В НАСЕЛЕННОМ ПУНКТЕ.....	19
Костюк К.А., Смиловенко О.О.	
ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА ПОЖАРНОГО-СПАСАТЕЛЯ ПОСРЕДСТВОМ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОВЕДЕНИЯ РАЗБОРА ЗАВАЛОВ.....	19
Хакимова Д.А., Нуркулов Ф.Н.	
РАЗРАБОТКА ОГНЕЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СПЕЦОДЕЖДЫ.....	19
Горовых О. Г., Канина М. А.	
ПРИМЕНЕНИЕ ОЗОНАТОРА ПРИ ДЕМЕРКУРИЗАЦИИ ЗАГРЯЗНЕННЫХ РТУТЬЮ ПОМЕЩЕНИЙ.....	19
Кодрик А. И.; Титенко А. Н., Виноградов С. А., Шахов С. М.	
РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УСТАНОВКИ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ КОМПРЕССИОННОЙ ПЕНЫ.....	19
Ахмедов М.А., Сираджитдинов А.Б.	
О ПОЖАРАХ ПРИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ.....	19
Юрьев Ю.И., Подболотов К.Б.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ	

**УДК 614.842.615**

**канд. тех. наук Кодрик А. И., канд. тех. наук Титенко А. Н.,  
канд. тех. наук, доц. Виноградов С. А.\* , С.М. Шахов\***

*Украинский научно-исследовательский институт гражданской защиты,  
г. Киев*

*\*Национальный университет гражданской защиты Украины, г. Харьков*

## **РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УСТАНОВКИ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ КОМПРЕССИОННОЙ ПЕНЫ**

Целью исследования было построение математической модели установки для генерации компрессионной пены с учетом особенностей ее конструкции и технологических параметров. Графическая среда имитационного моделирования Simulink (интегрированное в программную среду MatLab) позволяет с помощью отдельных блоков в виде направленных графов строить динамические модели. Это блок подачи газа, блок подачи смеси воды и пенообразователя, блок пеногенерирующей вставки и блок выходного сопла. Каждый из блоков представляет собой автономную математическую модель со своим входом и выходом, благодаря чему осуществляется взаимодействие между блоками в процессе выполнения общей задачи моделирования. Блоки можно менять в соответствии с изменениями конструкции установки, оставляя постоянной только внешнюю оболочку (количество входов, выходов, размерность) отдельного блока.

Разработанная математическая модель позволяет проводить расчеты параметров установки для генерации компрессионной пены в зависимости от ожидаемого времени ее работы и кратности компрессионной пены, которую необходимо получить, и исследовать влияние параметров пеногенерирующей вставки установки для генерации компрессионной пены на кратность компрессионной пены.

*Ключевые слова:* функционально-физическая схема, компрессионная пена, функциональный блок, входные параметры, выходные параметры.

**Ph. D. (tech.) A.Kodryk, Ph. D. (tech.) O. Titenko,  
Ph. D. (tech.) S. Vinogradov\*, S. Shakhov\***

*The Ukrainian Civil Protection Research Institute ,*

*\*National University of Civil Defence of Ukraine*

## **MATHEMATICAL MODEL OF THE DEVICE FOR GENERATING OF EXTINGUISHING COMPRESSED AIR FOAM**

The aim of the study was to build a mathematical model of the installation for the generation of compression foam, taking into account the peculiarities of its design and technological parameters. The Simulink graphical simulation

environment (integrated into the MatLab software environment) allows building dynamic models using separate blocks in the form of directed graphs. This is a gas supply unit, a unit for supplying a mixture of water and a foaming agent, a pinogen-generating unit, and an outlet nozzle unit. Each of the blocks is an autonomous mathematical model with its own input and output, due to which the interaction between the blocks is carried out in the process of performing the general modeling task. Blocks can be changed in accordance with changes in the design of the installation, leaving only the outer shell (number of inputs, outputs, dimension) of a separate block constant.

The developed mathematical model allows us to calculate the parameters of the installation for the generation of compression foam depending on the expected time of its operation and the multiplicity of the compression foam, which must be obtained, and to study the effect of the parameters of the pinogen insert of the installation for the generation of compression foam on the ratio of the compression foam.

*Key words:* functional-physical scheme, compression foam, functional block, input parameters, output parameters.

### **Введение**

Основная проблема при создании систем пожаротушения, потребляющих сжатый воздух, состоит в надлежащем регулировании потока воды и потока воздуха, которые подают в смесительную камеру таким образом, чтобы непрерывно обеспечивать создание пены, которая должна иметь соответствующие свойства для борьбы с огнем и остается стабильной с течением времени. Отметим, что технологии создания компрессионной пены в разных странах отличаются друг от друга схемами построения, количеством и видами пенообразователей, технологическими режимами – давлением, интенсивностью подачи компонентов, временем работы [1–4]. Для нас особый интерес вызывают технологии создания компрессионной пены с использованием отечественных пенообразователей и модернизированного оборудования, находящегося на оснащении подразделений. Результаты этих работ позволят начать внедрение в практику новых инновационных методов тушения пожаров с повышенной эффективностью и значительно меньшими материальными затратами.

Следует отметить, что все приведенные исследования по установкам для генерирования компрессионной пены направлены в основном на экспериментальное определение эффективности применения компрессионной пены для тушения пожаров различных веществ при использовании установок для генерации компрессионной пены с различными параметрами [5–7].

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 позволит аналитически получить оптимальные геометрические и технологические параметры установки для генерации компрессионной пены для конкретного случая ее применения при тушении пожара, выявить влияние технологических параметров процесса пенообразования, а именно: давления в системе, расхода воды и воздуха, типа и количества пенообразователя, возможных схем смешивания на эксплуатационные характеристики полученной пены, такие как устойчивость, огнетушащая способность, адгезия, позволит создавать эффективные системы по созданию компрессионной пены и осуществлять управление процессами пенообразования и пожаротушения.

## 2. Основная часть

Целью исследования является построение математической модели установки для генерации огнетушащей компрессионной пены.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

разработать функционально-физическую схему установки для генерации компрессионной пены;

разработать математическую модель установки для генерации компрессионной пены.

Анализ работ, посвященных проблеме генерации компрессионной пены стационарными и передвижными установками пожаротушения [8–10], позволил выбрать рабочую функционально-физическую схему установки для генерации компрессионной пены, которая представлена на рисунке 1.

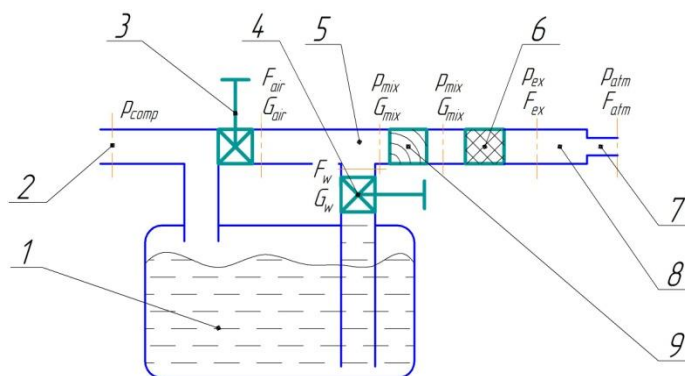


Рисунок 1 – Функционально-физическая схема установки для генерации компрессионной пены: 1 – емкость со смесью; 2 – вход для высокого давления; 3 – дроссель газовый; 4 – дроссель жидкостный; 5 – камера смешивания; 6 – пеногенерирующая вставка; 7 – выходное сопло; 8 – предкамера; 9 – статический смеситель

Установка для генерации компрессионной пены работает следующим образом. Смесь воды с пенообразователем (в заданном соотношении) находится в емкости 1, давление  $p_{comp}$  рабочего газа (воздуха), является энергетическим источником работы установки, подается к отверстию 2. Необходимое количество воздуха и смеси воды с пенообразователем регулируется в соответствии с дросселями: газовым 3, что имеет регулируемую площадь выходного сечения  $F_{air}$  и поток газа  $G_{air}$ , и жидкостным 4, что имеет регулируемую площадь выходного сечения  $F_w$  и поток смеси (вода с пенообразователем)  $G_w$ . Далее воздух смешивается со смесью воды с пенообразователем в камере смешивания 5 под давлением  $p_{mix}$ , имея поток  $G_{mix}$ , проходит через статический смеситель 9 и далее в пеногенерирующую вставку 6, где происходит генерация компрессионной пены, поступающей в предкамеру 8, которая имеет площадь сечения  $F_{ex}$  выходного сопла и находится под давлением  $p_{ex}$ . Готовая пена выходит через сопло 7, имеющее площадь выходного сечения  $F_{atm}$ .

#### 2.1 Разработка математической модели установки для генерации компрессионной пены

Достаточно часто математическая модель является многомерной системой уравнений алгебраических, дифференциальных, которую можно решать, как правило, только численными методами. Поэтому для построения математической модели была выбрано графическая среда имитационного моделирования Simulink (интегрированное в программную среду MatLab), что позволяет с помощью отдельных блоков в виде направленных графов строить динамические модели. Использование Simulink является удобным инструментом для решения таких проблем при описании стационарных и переходных процессов при проектировании конструкций.

Математическая модель установки для генерации компрессионной пены создана таким образом, что она является объединением отдельных блоков, каждый из которых представляет собой автономную математическую модель со своими входом и выходом, с помощью которых осуществляется взаимодействие между блоками в процессе выполнения общей задачи моделирования: блока подачи газа, блока подачи смеси воды и пенообразователя, блока статического смесителя, блока пеногенерирующей вставки, блока выходного сопла.

Эти отдельные блоки можно менять в соответствии с изменениями конструкции установки, оставляя постоянной только внешнюю оболочку (количество входов, выходов, размерность отдельного блока).

В математическом смысле этой моделью является система дифференциально-алгебраических уравнений для описания переходного процесса (для определенных заданных параметров) при подаче давления

на входное отверстие 2 установки на рисунке 1. Для каждого из функциональных блоков установки разработано математическое описание.

Входными параметрами для блока подачи газа (на блок-схеме: «Air», рисунок 3) являются:

$p_{comp}$  – давление на входе 2 (рисунок 1), Па;  $p_{mix}$  – давление в камере смешивания, 5 (рисунок 1), Па;  $d_a$  – диаметр отверстия сопла подачи газа, м;  $T$  – температура торможения газа, К;  $R_{air}$  – газовая постоянная для выбранного рабочего газа, Дж/(кг · К).

Для решения задачи моделирования блока подачи газа использован метод гидродинамических функций [11]. Поток газа  $G_a$  (массовый расход) через сопло, образующийся при дросселировании, будет вычисляться по формуле

$$G_a = \frac{\pi \cdot d_{air}^2 \cdot m_{const} \cdot p_{comp} \cdot \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \lambda \cdot \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}}}{4 \cdot \sqrt{T}}, \text{ кг/с}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – приведенная скорость газа;  $T$  – температура торможения газа, К;  $m_{const}$  – характерная постоянная [11].

Для блока подачи смеси воды с пенообразователем (на блок-схеме: «Liquid», рисунок 3) входными параметрами являются:

$p_{comp}$  – давление в емкости смеси 1 (рисунок 1), Па;  $p_{mix}$  – давление в камере смешивания 5 (рисунок 1), Па;  $d_w$  – диаметр отверстия сопла подачи смеси, м.

Исходя из равенства потенциальной энергии давления в емкости смеси 1 (рисунок 1) и кинетической энергии струи воды, выходящей из жидкостного дросселя 4 (рисунок 1), напишем уравнение

$$v_w = \sqrt{2 \cdot \frac{(p_{comp} - p_{mix})}{\rho_w}}, \text{ м/с}, \quad (2)$$

где  $\rho_w$  – плотность смеси воды с пенообразователем, кг/м<sup>3</sup>.

Тогда поток смеси воды с пенообразователем можно вычислить по формуле

$$G_w = \frac{\pi}{4} \cdot v_w \cdot \rho_w \cdot d_w^2, \text{ кг/с}. \quad (3)$$

В блоке статического смесителя (на блок-схеме: «Static Mixer», рисунок 3) происходит предварительное смешение газа и смеси воды с пенообразователем, в котором реализован принцип попеременного



правого и левого вращения потока смеси. Исходя из этого, в основе математического описания физических процессов этого блока лежит равенство работ пропульсивной силы и работы ускоренного вращения порции пены, находящейся в одном элементе статического смесителя:

$$\Delta p \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_s^2 \cdot t_s = J \cdot \varepsilon \cdot \varphi \quad (4)$$

где  $\Delta p$  – перепад давления на элементе статического смесителя, Па;  
 $D_s$  – диаметр элемента статического смесителя, м;  
 $t_s$  – длина элемента статического смесителя, м;  
 $J$  – момент инерции пены в элементе статического смесителя, кг·м<sup>2</sup>;  
 $\varepsilon$  – угловое ускорение в элементе статического смесителя, рад/с<sup>2</sup>;  
 $\varphi$  – величина углового поворота одного элемента статического смесителя, рад.

Итоговая итерационная формула для определения давления на выходе последовательно установленных  $n_s$  элементов статического смесителя в условиях адиабатического процесса:

$$P_{ex} = \sum_{i=1}^{n_s} P_i; P_{i+1} = P_i + n_s \cdot \frac{G^2}{2 \cdot t_s^2 \cdot D_s^2} \cdot \frac{(R \cdot T_n \cdot (k_{FER} - 1) \cdot \rho_{a\_NC} + P_i)}{P_i \cdot ((k_{FER} - 1) \cdot \rho_{a\_NC} + \rho_{liq})} \quad (5)$$

, Па,

где  $n_s$  – число последовательно установленных элементов статического смесителя;

$G$  – массовый расход смеси, кг/с;

$R$  – универсальная газовая постоянная для данного газа, Дж/кг·К;

$T_n$  – абсолютная температура смеси, К;

$\rho_{a\_NC}$  – плотность газа при нормальных условиях, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{liq}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Разработка математического описания блока пеногенерирующей вставки (на блок-схеме: «Foam Generator», рисунок 3) состояла из двух этапов:

вывод предварительной формулы исходя из физических принципов, описывающих прохождение пены через пористое тело;

аппроксимирование экспериментальных данных к предварительной формуле путем введения коэффициентов.

Для вывода предварительной формулы использовались следующие формулы.

Формула кратности пены в зависимости от давления:

$$k_p = \frac{P_n}{P} \cdot (k_{FER} - 1) + 1 \quad (6)$$

где  $k_{FER}$  – кратность пены при нормальных условиях.

Формула коэффициента отношения толщины пленки к радиусу пузыря пены:

$$k_{h-D} = 1/2 \cdot \left( 1 - \left( \frac{k_p - 1}{k_p} \right)^{\frac{1}{3}} \right) \quad (7)$$

где  $k_p$  – кратность смеси в условиях сжатия под текущим давлением процесса.

Формула зависимости эффективной вязкости пены от коэффициента отношения толщины пленки к радиусу пузыря:

$$\mu_{foam} = \mu_{liq} \cdot k_{h-D}, \text{ Па}\cdot\text{с}, \quad (8)$$

где  $\mu_{liq}$  – динамическая вязкость смеси воды с пенообразователем, Па·с

Формула падения давления по длине:

$$\delta p_l(p, \omega) = 32 \cdot \mu_{foam}(p) \cdot \frac{\omega_{ch}}{D_{ch}^2}, \text{ Па/м}, \quad (9)$$

где  $\omega_{cp}$  – скорость в каналах пеногенерирующей вставки:

$$\omega_{ch} = \frac{\omega}{1 - k_s}, \text{ м/с} \quad (10)$$

$k_s = 0,74$  – коэффициент плотности упаковки шаров пеногенерирующей вставки;

$D_{ch}$  – диаметр каналов пористого тела:

$$D_{ch} = \frac{4 \cdot (1 - k_s)}{f}, \text{ м}, \quad (11)$$

$f$  – удельная поверхность каналов согласно [13]:

$$f = \frac{3}{4} \cdot \frac{k_s}{d_b}, \text{ м}^2/\text{м}^3 \quad (12)$$

где,  $d_b$  – диаметр шаров пеногенерирующей вставки, м.

Предполагая, что движение пены является адиабатным процессом, плотность пены определится как:

$$\rho = \frac{p \cdot ((k_{FER} - 1) \cdot \rho_{a\_MC} + p_{liq})}{R_{air} \cdot T_n \cdot (k_{FER} - 1) \cdot \rho_{a\_MC} + p}, \text{ кг/м}^3 \quad (13)$$

А также, учтя, что общий массовый расход смеси:

$$G = \omega_{ch} \cdot \rho \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_g, \text{ кг/с}, \quad (14)$$

где  $D_g$  – внешний диаметр внутренней полости пеногенерирующей вставки, и, решая совместно (6)–(14)

$$\Phi(p, G) = k_{app} \cdot \frac{k_s^2}{(1-k_s)^4 \cdot d_b^2} \cdot \frac{\mu_{liq}}{1 - \left( 1 - \left( \left( \frac{p}{p_0} \right)^{1.5} \cdot (k_{FER} - 1) + 1 \right)^{-1} \right)} \cdot \frac{G \cdot R_{air} \cdot T_n \cdot (k_{FER} - 1) \cdot \rho_{a\_MC} + p}{D_g^2 \cdot p \cdot ((k_{FER} - 1) \cdot \rho_{a\_MC} + p_{liq})} \quad (15)$$

, Па/м

где  $k_{app} = 8.021$  – коэффициент аппроксимации, определенный опытным путем на изготовленной модели пеногенератора. Максимальное относительное отклонение значений, получаемых по формуле (15) от опытных данных, не превышает 15,4 % на следующем диапазоне изменения исходных параметров:  $p$  от 0,1 Мпа до 0,6 Мпа,  $k_{FER}$  – от 3 до 14,  $d_b$  – испытывались: 1 мм, 2 мм, 3 мм, объемный расход: от 9,5 до 25,2 л/мин.

Тогда для нахождения зависимости потока пены при заданных параметрах, интегрируя (15), получим:

$$G = \frac{(1-k_s)^4 \cdot d_b^2 \cdot D_g^2 \cdot ((k_{FER} - 1) \cdot \rho_{a\_MC} + p_{liq})}{k_{app} \cdot k_s^2 \cdot L \cdot \mu_{liq}} \cdot \int_p^{p_0} \left( 1 - \left( \left( \frac{p}{x} \right)^{1.5} \cdot (k_{FER} - 1) + 1 \right)^{-1} \right) \cdot \frac{x}{p \cdot (k_{FER} - 1) + x} dx, \quad (16)$$

кг/с.

Рассмотрим блок выходного сопла (на блок-схеме: «Mix Jet», рисунок 3). Его входными параметрами являются:

$p_{ex}$  – давление на входе в предкамере 8 (рис. 1), в сопло, Па;  $p_a$  – статическое давление окружающей среды, 0,1 МПа;  $d_j$  – диаметр отверстия сопла, м,  $\kappa$ ,  $R_{air}$  – показатель адиабаты и газовая постоянная для воздуха, Дж/(кг·К).

Исходными данными для создания математического описания этого блока является закон сохранения энергии:

$$\int_{p_{ex}}^{p_a} \frac{1}{\rho_{mix}(p)} dp = \frac{\omega_{ex}^2 - \omega_{atm}^2}{2}, \quad (17)$$

где  $p_{ex}$  – давление в предкамере 8 (рис. 1), Па;  $p_a$  – нормальное атмосферное давление на выходе из сопла, Па;  $\omega_{ex}$ ,  $\omega_{atm}$  – скорости на входе и выходе сопла, м/с,

и закон сохранения массового расхода:

$$G = \omega_{ex} \cdot \rho_{mix}(p_{ex}) \cdot F_{ex} = \omega_{atm} \cdot \rho_{mix}(p_a) \cdot F_{atm}, \text{ кг/с}, \quad (18)$$

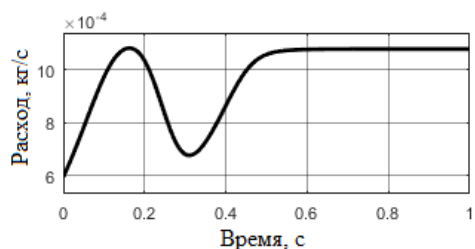
где  $F_{ex}$ ,  $F_{atm}$  – площадь сечения на входе и выходе сопла, м<sup>2</sup>.

Тогда, решая систему из уравнений (17) и (18) с учетом принятых допущений, получим величину потока смеси газа и жидкости (массового расхода)  $G$  через отверстие сопла:

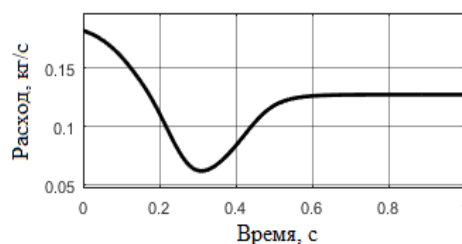
$$G = \left( \frac{\left( p_{ex} - p_a - \kappa \cdot p_{ex}^{\frac{1}{\kappa}} \cdot (\kappa - 1) \cdot p_{atm}^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} + \kappa \cdot (\kappa \cdot p_{ex} - p_{atm}) \right)}{(\kappa - 1) \cdot \left[ \kappa \cdot F_{atm}^2 - \left( F_{atm} \cdot (\kappa - 1) \cdot \left( \frac{p_{ex}}{p_{atm}} \right)^{\frac{1}{\kappa}} + F_{atm} \right) \right]} \right) \cdot (\rho_{air} \cdot \kappa + \rho_{liq} - \rho_{air}) \cdot F_{ex} \cdot F_{atm}^{\frac{1}{\kappa}} \quad (19)$$

Взаимодействие рассмотренных отдельных блоков общей математической модели реализовано на базе имитационного моделирования Simulink и показано в виде блок-схемы на рисунке 3. Результаты численного моделирования переходных процессов в установке при ее запуске и переходе в стационарный режим при следующих исходных параметрах (обозначения согласно рисунку 3): давление на входе в установку,  $p_{comp} = 0,9$  МПа; диаметр воздушного сопла,  $d_{kiq} = 2,4$  мм; диаметр воздушного сопла,  $d_a = 0,8$  мм; диаметр проходного отверстия статического смесителя,  $D_{Sam} = 12$  мм; длина статического смесителя,  $L_{sam} = 84$  мм, длина элемента статического смесителя,  $t = 12$  мм; угол поворота потока смеси в элементе статического смесителя,  $\Phi_i = \pi/2$  рад;

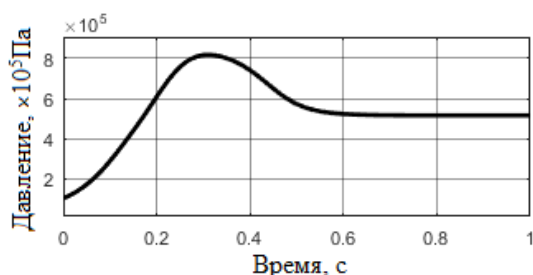
диаметр проходного отверстия пеногенератора  $D_{cam1} = 25$  мм; длина пеногенератора,  $L_{cam1} = 100$  мм, диаметр шаров наполнения пеногенератора,  $d_b = 1$  мм; диаметр предкамеры выходного сопла,  $D_{cam2} = 20$  мм; длина предкамеры выходного сопла,  $L_{cam2} = 12$  мм; выходной диаметр сопла,  $d_{Jet} = 10$  мм, показано на рисунке 2.



а) Зависимость расхода воздуха от времени при включении генерации пены



б) Зависимость расхода смеси воды с пенообразователем от времени при включении генерации пены



в) Зависимость давления в камере смешения поз. 5 (см. рис.1) от времени при включении генерации пены

Рисунок 2 – Графики имитации в системе Simulink переходных процессов в установке по получению компрессионной пены

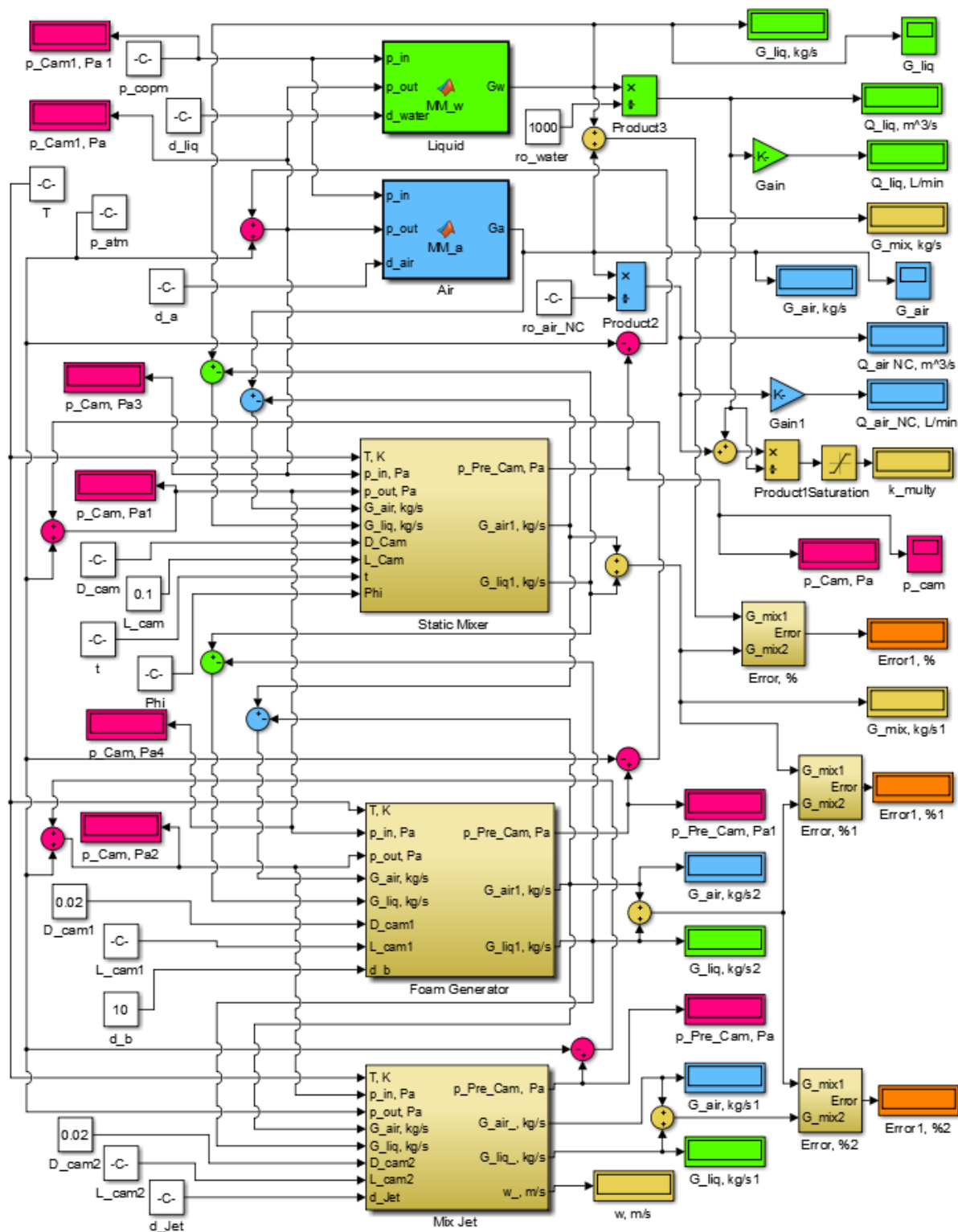


Рисунок 3 – Блок-схема имитационной модели установки по получению компрессионной пены.

### **Заключение**

Наиболее важным результатом разработки математической модели установки для генерации компрессионной пены является возможность проведения технического расчета ее параметров с учетом потребностей.

Разработанная математическая модель установки генерации компрессионной пены позволяет решать следующие прикладные и научные задачи:

проводить расчеты параметров установки в зависимости от ожидаемого времени ее работы, определять особенности тушения различных видов пожаров;

проводить расчеты параметров установки в зависимости от кратности компрессионной пены, которую необходимо получить;

исследовать влияние параметров пеногенерирующей вставки установки на кратность компрессионной пены.

Результаты были использованы при создании установки [14], на которой проведены и подтверждены расчетные значения [15]. Были измерены основные выходные характеристики установки, при этом: относительное отклонение массового расхода воздуха составила +23,8 % (фактический:  $1,3 \times 10^{-3}$  кг/с, расчетный:  $1,05 \times 10^{-3}$  кг/с), относительное отклонение массового расхода пенообразующей смеси составила +21 % (фактический: 0,015 кг/с, расчетный: 0,0125 кг/с), относительное отклонение коэффициента кратности 12,9 % (фактический: 6,2, расчетный: 7).

### **Литература**

1. CAFS - Straight answers for the beginner or the experienced user [Electronic resource]—cafsinfo.com,2008. - Mode of access: <http://www.cafsinfo.com/index.html> Date of access: 05.03.2009.

2. Compressed Air Foam Systems [Электронный Ресурс]/ Neal Brooks. – Режим доступа: <http://compressedairfoamsystem.com>.

3. Jing-yuan C. Research of Integrated Compressed Air Foam System of Fixed (ICAF) for Liquid / Jing-yuan C, Mao X. Procedia Engineering. 2014. Vol. 71. P 44 – 56. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.04.007>

4. Пеногенерирующие системы со сжатым воздухом – средство пенного пожаротушения нового поколения / О.Д. Навроцкий [и др.] // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2012. – № 1 (15). – С. 22–31.

5. Залесов, С.В. Система пожаротушения NATISK для остановки и локализации лесных пожаров / С.В. Залесов, Г.А. Годовалов,

А.А. Кректунов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. URL: [www.science-education.ru/117-12757](http://www.science-education.ru/117-12757).

6. Камлюк, А.Н. Тушения пожаров пеногенерирующими системами со сжатым воздухом / А.Н. Камлюк, О.Д. Навроцкий, А.В. Грачулин // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2017. – Т. 1, № 1. – С. 44–53.

7. Jing-yuan Chenga. Experimental Research of Integrated Compressed Air Foam System of Fixed (ICAF) for Liquid Fuel / Jing-yuan Chenga Mao Xub // Procedia Engineering 71, 2014 p, 44 – 56 с.

8. Абрамов, Ю.А. Моделирование процессов в пожарных стволах / Ю.А. Абрамов, В.Е. Росоха, Е.А. Шаповалова. – Харьков, 2001. – 195 с.

9. Функціонально-фізична схема установки для генерації компресійної піни / О.Ф. Нікулін [та др.] // Науково-технічний збірник «Комунальне господарство міст». – 2018. – Вып. 7 (146). – С. 163–166.

10. Mawhinney, J. Handbook of fire protection engineering / J. Mawhinney, G. Back. 2016. P. 645. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0>.

11. Абрамович, Г.Н. Прикладная газовая динамика / Г.Н. Абрамович. – М., 1960. – 600 с.

12. Кутателадзе, С.С. Гидродинамика газожидкостных систем / С.С. Кутателадзе, М.А. Стырикович. – М., 1976. – 143 с.

13. Плановский, А.Н. Процессы и аппараты химической технологии / А.Н. Плановский, В.М. Рамм, С.З. Каган. – М., 1961. – 848 с.

14. Розроблення експериментального лабораторного зразка системи пінного пожежогасіння, що споживає стиснене повітря (CAFS) / О.Ф. Нікулін [та др.] // Цивільний захист та пожежна безпека. – 2018. – № 2 (6). – С. 4–9.

15. Залежність експлуатаційних характеристик компресійної піни від технологічних параметрів процесу піноутворення / А.І. Кодрик [та др.] // Цивільний захист та пожежна безпека. – 2019. – № 1 (7). – С. 4–12.

