

УДК 699.816.35

Е. В. Макарова, кандидат технических наук
А. Н. Рыкин, магистрант
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В СПРИНКЛЕРНЫХ УСТАНОВКАХ ПОЖАРОТУШЕНИЯ

Обосновывается актуальность построения математической модели, описывающей изменение гидродинамических параметров потока жидкости в трубопроводной системе спринклерной автоматической установки пожаротушения. При математическом описании движения жидкости на участке трубопроводной системы автоматической установки пожаротушения применяется запись уравнения движения в виде обыкновенного дифференциального уравнения, описывающего изменение скорости жидкости по времени. На тестовом примере проведена оценка адекватности расчетных значений скорости движения жидкости, полученных по предлагаемой модели с результатами аналитического решения, выбран наиболее оптимальный шаг интегрирования. Разработанная математическая модель апробирована на примере аксонометрической схемы спринклерной автоматической установки пожаротушения. Приводятся результаты численных расчета изменения по времени скорости и массового расхода жидкости в зависимости от условий вскрытия теплового замка спринклерного оросителя с учетом изменения давления в гидропневмобаке, в зависимости от протяженности участков распределительной трубы. Производится численное исследование влияния изменения площади проходного сечения спринклерного оросителя и давления в гидропневмобаке по времени на скорость и массовый расход жидкости. Представлены выводы для случаев, если ороситель имеет задержку по времени до достижения полного проходного сечения и если в системе присутствует непостоянное давление.

Ключевые слова: спринклерные системы, трубопровод, математическая модель, гидродинамические параметры.

Основной недостаток спринклерной автоматической установки пожаротушения (АУП) является сравнительно большая инерционность, приводящая к неравномерности распределения гидродинамических параметров по времени при выходе системы на стационарный режим. В связи с этим актуальным является проведение исследований, связанных с определением влияния факторов процесса на время нестационарного режима движения жидкости в распределительном трубопроводе установок пожаротушения.

Оценка изменения гидродинамических параметров в трубопроводных системах спринклерных АУП до выхода на стационарный режим возможна при математическом моделировании движения огнетушащих сред (жидкости и газа) [1]. Задачей исследования является проведение параметрического анализа изменения скорости V и массового расхода жидкости G в зависимости:

- от условий вскрытия теплового замка спринклерного оросителя;
- изменения давления в гидропневмобаке;
- удаленности распределительного трубопровода от гидропневмобака.

Постановка задачи

На рис. 1 приведена схема гидросистемы, предлагаемая для проведения численных расчетов.

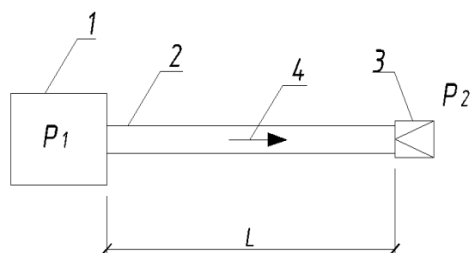


Рис. 1. Схема гидросистемы

При вскрытии теплового замка спринклерного оросителя 3 жидкость 4 по направлению движения потока 4 от распределительного гидропневмобака 1 с начальным избыточным давлением p_1 движется по распределительному трубопроводу 2 длиной L в направлении области истечения с давлением p_2 , в общем случае равным атмосферному.

Математическая модель

Основой математического описания движения жидкости на участке трубопроводной системы спринклерных автоматических установок пожаротушения является уравнение движения, которое представлено в виде [2, 3].

$$a_k \frac{\partial}{\partial t}(F\rho V) + a_k \frac{\partial}{\partial x}(F\rho V^2) + F\rho g_x + F \frac{\partial p}{\partial x} + \Pi\tau = 0, \quad (1)$$

где t – время; F – площадь поперечного сечения трубы; ρ – плотность жидкости; V – скорость потока; τ – напряжение трения; a_k – коэффициент Кориолиса (примем для простоты изложения $a_k \approx 1$); p – давление; $\Pi = \pi d$ – смоченный периметр поверхности трубопровода; d – диаметр проходного сечения трубопровода.

В работе [4] показано, что уравнение (1) для участка протяженностью $\Delta x = L$ может быть записано в виде

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{L\rho} \sum p_i, \quad \text{где } p_i = p_1 - p_2 - p_{tr}, \quad (2)$$

где p_1 – начальное избыточное давление в гидропневмобаке; p_2 – давление спринклерного оросителя, в общем случае равным атмосферному; p_{tr} – потери давления.

Расчет потерь давления производится по формуле

$$p_{tr} = \lambda \frac{L}{d} \frac{\rho V^2}{2}. \quad (3)$$

Для прямых гладких цилиндрических труб экспериментально установлена зависимость коэффициента гидравлического трения λ от числа Рейнольдса [4]:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \text{ – для ламинарного режима движения}$$

жидкости ($Re \leq 2320$);

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}} \text{ – для турбулентного режима движения}$$

жидкости ($Re > 2320$),

где Re – число Рейнольдса $Re = \frac{V \cdot d}{\nu}$, где ν – кинематическая вязкость, m^2/c .

Будем считать, что при $t = 0$ рассматриваем участок $\Delta x = L$ (рис. 1), заполненный жидкостью; при $t = t + \Delta t$ в трубе создается перепад давления $\Delta p = p_2 - p_1$, в результате чего происходит движение жидкости.

При условии что жидкость несжимаемая, массовый расход жидкости определяется соотношением $G = V\rho F$ [5]. Отсюда $V = G/\rho F$.

С учетом уравнения (2) получим изменение массового расхода [6]:

$$\frac{dG}{dt} = \frac{F}{L} \sum p_i \quad (4)$$

Оценка адекватности модели

Сравним получаемые расчетные значения скорости по модели со значением скорости для стационарного течения по уравнению:

$$V = \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\xi_p}} \quad (5)$$

где $\Delta p = p_1 - p_2$ – перепад давлений на участке; ξ – коэффициент гидравлических сопротивлений, определяемый по формуле

$$\xi = \lambda \frac{L}{d}$$

Для тестового расчета примем исходные данные: $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$; $p_1 = 202650 \text{ Па}$; $p_2 = 101325 \text{ Па}$; $L = 100 \text{ м}$; $\nu = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $d = 0,05 \text{ м}$.

Результат решения уравнения (1) методом Эйлера приведен на рис. 2.

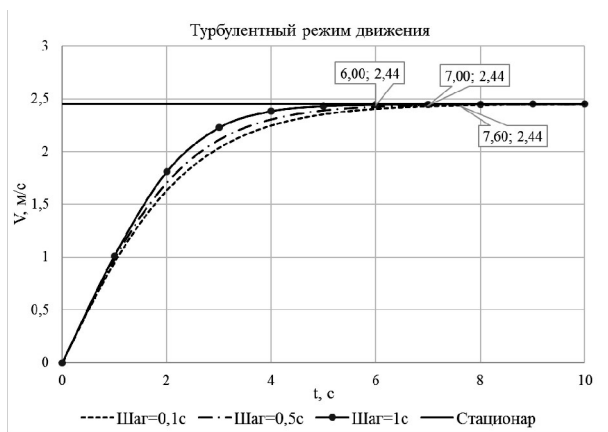


Рис. 2. Зависимость скорости движения жидкости в трубопроводе во времени

Графики рис. 2 показывают адекватность модели описания нестационарного течения (1) со значением скорости для стационарного течения (5). Видно, что зависимость скорости движения жидкости от времени прямо пропорциональна, с некоторого момента графики скорости совпадают ($\approx 2,44 \text{ м/с}$).

При установившемся режиме число Рейнольдса равно

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} = \frac{2,44 \cdot 0,05}{1 \cdot 10^{-6}} = 122000$$

Присутствует турбулентный режим движения жидкости.

На рис. 2 представлены графики выхода системы на рабочий режим при применении различных временных шагов (таблица).

Время выхода системы на рабочий режим при различном шаге

Шаг по времени Δt , с	0,1	0,5	1,0
Время выхода на рабочий режим, с	7,6	7	6

Для дальнейших расчетов выберем наиболее оптимальный шаг интегрирования $\Delta t = 0,1 \text{ с}$.

Применение модели

Рассмотрим разработанную математическую модель на примере (рис. 3).

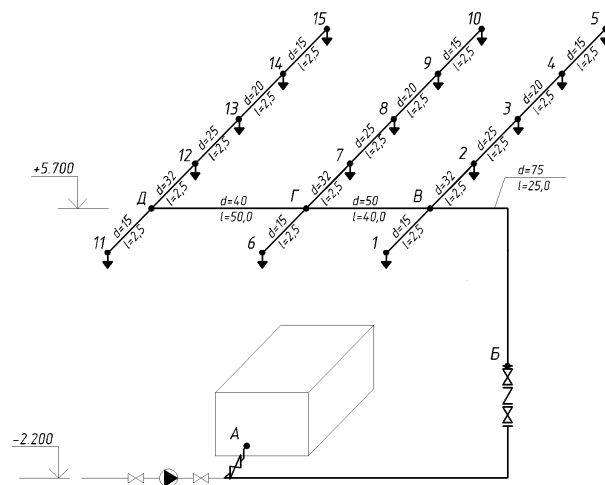


Рис. 3. Аксонометрическая схема спринклерной АУП: А-Д – питающий трубопровод; 1-5, 6-10, 11-15 – распределительный трубопровод

Проведем исследования изменения скорости и массового расхода жидкости в зависимости от условий вскрытия теплового замка спринклерного оросителя и с учетом изменения давления в гидропневмобаче.

Исходные данные: $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$; $p_1 = 253312,5 \text{ Па}$; $p_2 = 101325 \text{ Па}$; $\xi_m = 30$; $\nu = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Рассмотрим случаи после вскрытия теплового замка спринклерного оросителя:

1. Вода поступает из бака (т. А) в ороситель 15.
2. Вода поступает из бака (т. А) в ороситель 10.
3. Вода поступает из бака (т. А) в ороситель 5.

На рис. 4 представлена зависимость изменения давления p по времени t в системе при вскрытии оросителей различной отдаленности.

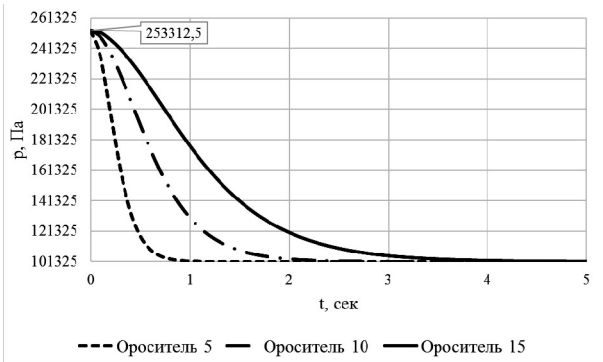


Рис. 4. График изменения давления p в системе по времени t при вскрытии оросителей различной отдаленности

Из рис. 4 видно, что чем ближе ороситель к пневмобаку 1 (т. А рис. 3), тем снижение давления p между ними осуществляется за меньшее время.

На рис. 5 представлена зависимость изменения скорости истечения от различной отдаленности оросителей.

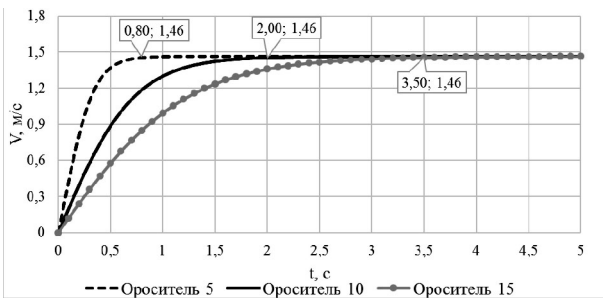


Рис. 5. График изменения скорости истечения по времени при вскрытии оросителей различной удаленности

Из рис. 5 видно, что чем ближе ороситель к пневмобаку 1 (т. А рис. 3), тем время выхода системы на рабочий режим сокращается.

Открытие отверстия спринклерного оросителя имеет определенную задержку по времени t_0 до достижения полного проходного сечения f_p . Данную зависимость можно отразить графически (рис. 6).

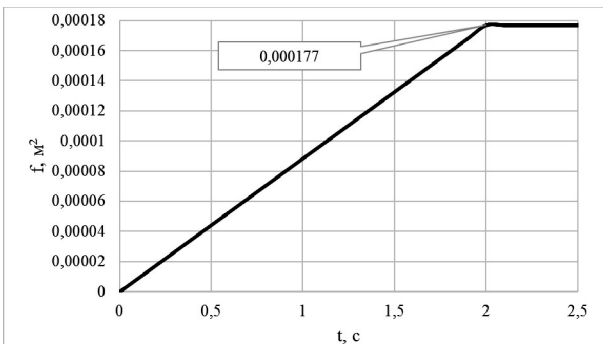


Рис. 6. График достижения полного проходного сечения оросителя

Из рис. 6 видно, что время достижения полного проходного сечения оросителя $f_p = 1,77 \text{ см}^2$ составляет $t_0 = 2 \text{ с}$.

Отразим на рис. 7 зависимость на примере массового расхода жидкости при вскрытии наиболее приближенного к баку (к т. А рис. 3) оросителя 15.

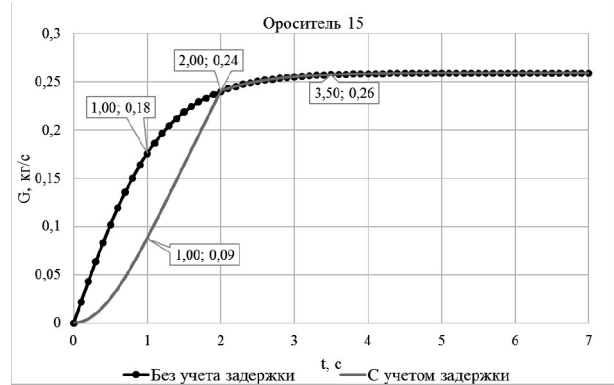


Рис. 7. Зависимость массового расхода жидкости от времени для оросителя 15

Из рис. 7 видно, что в первые 2 секунды работы системы массовый расход жидкости с учетом заданной задержки зависит от величины поперечного сечения спринклера: через 1 с площадь проходного сечения будет равна $0,884 \text{ см}^2$, что в 2 раза меньше полного проходного сечения $1,77 \text{ см}^2$, таким образом, массовый расход через 1 с работы системы уменьшится в 2 раза и будет равен $0,09 \text{ кг/с}$. Через 2 секунды работы спринклер полностью откроется, достигнет своего полного проходного сечения, и массовый расход будет равен $0,24 \text{ кг/с}$. Система выйдет на рабочий режим через 3,5 с с массовым расходом $G = 0,26 \text{ кг/с}$.

В общем случае давление в пневмобаке является непостоянной величиной. Примем, что изменение давления p_1 по времени t описывается зависимостью, приведенной на рис. 8.

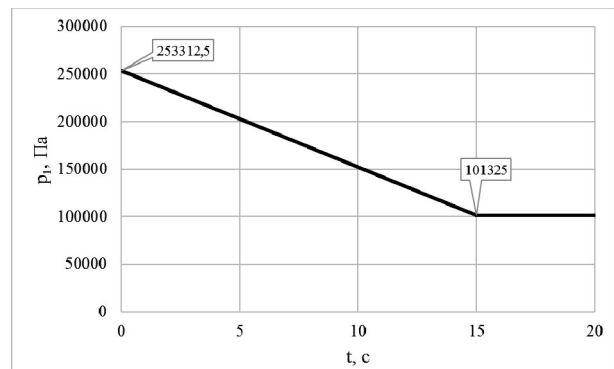


Рис. 8. Закон изменения давления p_1 по времени t

Из рис. 8 видно, что время изменения давления от $p_{1\text{нач}} = 253312,5 \text{ Па}$ до $p_{1\text{кон}} = 101325 \text{ Па}$ равно $t_0 = 15 \text{ с}$.

На рис. 9 представлена зависимость влияния постоянного и переменного давления на время выхода системы на рабочий режим для оросителя 15.

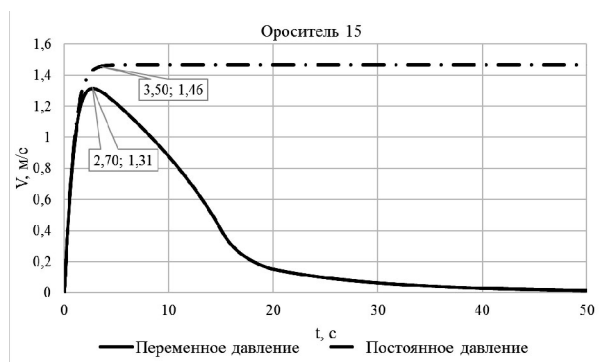


Рис. 9. Влияние постоянного и переменного давления на время выхода системы на рабочий режим для оросителя 15

Из рис. 9 видно, что при непостоянном давлении (рис. 8) скорость истечения после достижения своего максимального значения (1,31 м/с) будет изменяться в зависимости от закона изменения давления. В данном случае скорость истечения будет постоянно убывать до нуля.

Выводы

1. В случае если ороситель имеет задержку по времени до достижения полного проходного сечения, массовый расход жидкости напрямую зависит от текущей площади поперечного сечения спринклера.

2. В случае если в системе присутствует непостоянное давление (рис. 9), скорость истечения после достижения своего максимального значения (1,31 м/с) будет изменяться в зависимости от закона изме-

нения давления. В данном случае скорость истечения будет постоянно убывать до нуля.

Библиографические ссылки

1. Рыкин А. Н., Макарова Е. В., Макаров С. С. Математическая модель движения жидкости в трубопроводном участке системы спринклерных автоматических установок пожаротушения // Современные научные исследования и разработки : Международная научно-практическая конференция, г. Прага. – Чехия : Мир науки, 2017. – С. 155–163.
2. Макаров С. С., Чекушиев К. Э., Макарова Е. В. Математическая модель охлаждения цилиндрической заготовки одномерным нестационарным потоком воды // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2014. – № 4 (207). – С. 196–202.
3. Макаров С. С., Чекушиев К. Э. Способы регулировки ширины кольцевой щели спрейеров осевого типа // Труды Института механики УрО РАН «Проблемы механики и материаловедения» : материалы конференции «Актуальные проблемы математики, механики, информатики». – 2014. – С. 106–110.
4. Рыкин А. Н., Макарова Е. В., Макаров С. С. Математическая модель движения жидкости в трубопроводном участке системы спринклерных автоматических установок пожаротушения
5. Гусев В. П. Основы гидравлики : учеб. пособие. – Томск : Изд-во ТПУ, 2009. – 172 с.
6. Там же.
7. Макаров С. С. Математическая модель гидравлического трубопроводного участка силовой энергетической установки // Вестник ИжГТУ. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2006. – Вып. 3. – С. 26–29.

E. V. Makarova, PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU
A. N. Rykinin, Master's Degree Student, Kalashnikov ISTU

Study of Hydrodynamic Parameters in Sprinkler Fire Extinguishing Systems

The actuality of constructing a mathematical model describing the change in the hydrodynamic parameters of the liquid flow in the pipeline system of a sprinkler automatic fire extinguishing installation is substantiated. In the mathematical description of fluid motion in the section of the pipeline system of an automatic fire extinguishing system, a motion equation is written in the form of an ordinary differential equation describing the change in the fluid velocity with respect to time. In the test example, the adequacy of the calculated values of the fluid velocity obtained by the proposed model with the results of the analytical solution was estimated, the most optimal integration step was chosen. The developed mathematical model is approved by an example of an axonometric scheme of a sprinkler automatic fire extinguishing installation. The results of numerical calculations of the time variation of the velocity and mass flow rate of the liquid are presented, depending on the conditions for opening the sprinkler thermal lock, taking into account the pressure change in the gyro-pneumatic tank, depending on the length of the distribution pipe sections. A numerical study is made for the effect of the change in the area of the cross-sectional area of the sprinkler irrigation system and the pressure in the hydropneumatic tank in time on the speed and mass flow of the liquid. Conclusions are given for cases where the sprinkler has a time delay before reaching the full flow cross-section, and if there is a non-constant pressure in the system.

Keywords: sprinkler systems, pipelines, mathematical model, hydrodynamic parameters.

Получено: 30.05.17