

А. С. Дмитриченко, канд. техн. наук, доцент,
 И. В. Качанов, д.т.н, профессор, М. В. Кудин, канд. техн. наук, доцент,
 И. М. Шаталов, ст. преподаватель, М. К. Щербакова, ст. преподаватель,
 К. Ю. Быков, магистрант, В.С. Рабченя, студентка
 Белорусский национальный технический университет,
 г. Минск, Республика Беларусь

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ОГNETУШАЩЕЙ ЖИДКОСТИ ИЗ СТВОЛА УСТАНОВКИ ИМПУЛЬСНОГО ПОЖАРОТУШЕНИЯ

В настоящее время все больше внимание уделяется повышению эффективности тушения пожаров за счет использования распыленной воды. В Республике Беларусь и за рубежом основным техническим устройством формирования распыленных струй в импульсном режиме является переносная установка импульсного пожаротушения (УИП).

Анализ публикаций показал, что, несмотря на широкое распространение технологий импульсного пожаротушения, в настоящее время отсутствуют научно обоснованные методики, позволяющие определить быстродействие и интенсивность подачи огнетушащих веществ при использовании УИП, что снижает эффективность их применения.

С этой целью было проведено компьютерное моделирование формирования и движения распыленной огнетушащей жидкости на выходе из ствола УИП в программном комплексе «ANSYS CFX» на модели ствола УИП, геометрические размеры которого соответствовали реальным размерам ствола, используемого при пожаротушении. При численном моделировании этого процесса использовалась математическая модель массопереноса двухфазного потока в виде системы уравнений распыливания жидкости:

$$\left\{ \begin{array}{l} -grad p' + \mu' \nabla^2 \vec{\omega}' = \rho' \frac{D\vec{\omega}'}{dt}; div \vec{\omega}' = 0; \\ -grad p'' = \rho'' \frac{D\vec{\omega}''}{dt}; div \vec{\omega}'' = 0; \\ \mu' \left(\frac{\partial \omega'_i}{\partial x_k} + \frac{\partial \omega'_k}{\partial x_i} \right)_{гр} = -\rho'' \left(\overline{v_i v_k} \right)_{гр}; \\ p' - 2\mu' \left(\frac{\partial \omega'_k}{\partial x_k} \right)_{гр} = p'' - \rho'' \left(\overline{v_k^2} \right)_{гр} + \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_S} \right); \\ \overline{\omega'_{гр}} = \overline{\omega''_{гр}} \end{array} \right. \quad (1)$$

и уравнения динамики пузырька Релея-Плессета

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{2}{3} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{2\sigma}{\rho R} = \frac{P_{\text{н}} - P}{\rho}. \quad (2)$$

Упрощенная запись уравнения движения пузырька позволила создать три модели массопереноса при движении распыленной огнетушащей жидкости на выходе из ствола УИП: модель Singhal; модель Zwart-Gerber-Belamri и модель Schnerr-Sauer [1].

В процессе моделирования постоянно менялась скорость подачи распыливающего сжатого газа в пределах от 5 до 200 м/с и выше.

Режимы распада струи ограничены следующими значениями критерия Вебера [2]:

$$We' = 16,6 \left(\frac{\mu_{\text{ж}}^2}{\rho_{\text{ж}} \cdot d_0 \cdot \sigma_{\text{ж}}} \right)^{0,3} \left(\frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho'_{\Gamma}} \right)^{1,05}, \quad (3)$$

$$We'' = 266 \left(\frac{\mu_{\text{ж}}^2}{\rho_{\text{ж}} \cdot d_0 \cdot \sigma_{\text{ж}}} \right)^{0,133} \left(\frac{\rho_{\text{жс}}}{\rho'_{\Gamma}} \right)^{0,8}, \quad (4)$$

где $\mu_{\text{ж}}$ – динамическая вязкость жидкости.

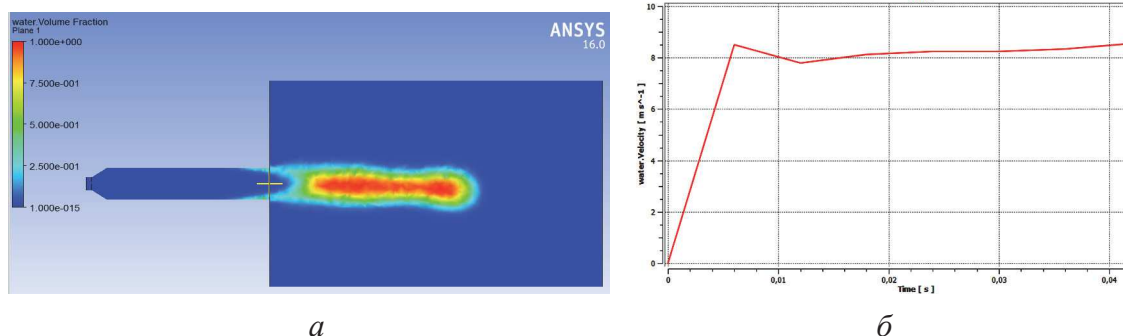


Рисунок 1.

а – формирование струи огнетушащей жидкости на выходе из жидкостной камеры ствола УИП при скорости подачи распыливающего сжатого газа 50 м/с;

б – график изменения во времени скорости движения огнетушащей струи (на оси ствола) на выходе из жидкостной камеры ствола УИП при скорости подачи распыливающего сжатого газа 50 м/с

При небольших скоростях истечения, когда критерий Вебера $We \geq We'$, происходит осесимметричный распад истекающей струи, и в данном случае главную роль играют силы инерции, трения и поверхностного натяжения, под воздействием которых на поверхности струи образуются симметричные волны, развитие которых приводит к разрушению струи (Рис. 1). С увеличением скорости истечения проис-

ходит смещение критерия Вебера в интервал $We' \leq We < We''$ и течение переходит в турбулентно-импульсный режим (Рис. 2).

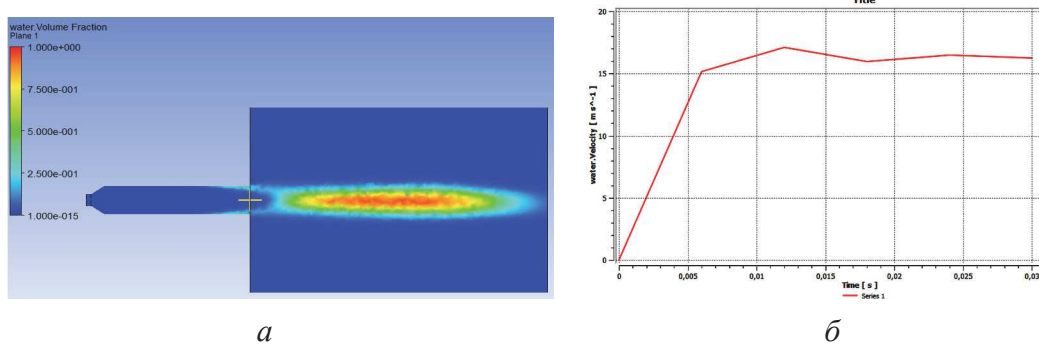


Рисунок 2.

- a* – формирование струи огнетушащей жидкости на выходе из жидкостной камеры ствола УИП при скорости подачи распыливающего сжатого газа 100 м/с;
- б* – график изменения во времени скорости движения огнетушащей струи (на оси ствола) на выходе из жидкостной камеры ствола УИП при скорости подачи распыливающего сжатого газа 100 м/с

В этом режиме возникают пульсационные силы давления, поперечные составляющие которых вызывают на поверхности струи нерегулярные волны, колебание струи в целом и ее последующее разрушение в режиме сохраняющегося волнообразного распада. Дальнейшее увеличение скорости истечения приводит к увеличению критерия Вебера до значений $We \geq We'$, при этом возрастает интенсивность турбулентного перемешивания и турбулентно-пульсационный режим распыливания переходит в чисто инерционное распыление (с возможной кавитацией), вследствие чего, струя начинает распадаться непосредственно у отверстия истечения в режиме кавитационно-инерционного распыла (Рис. 3).

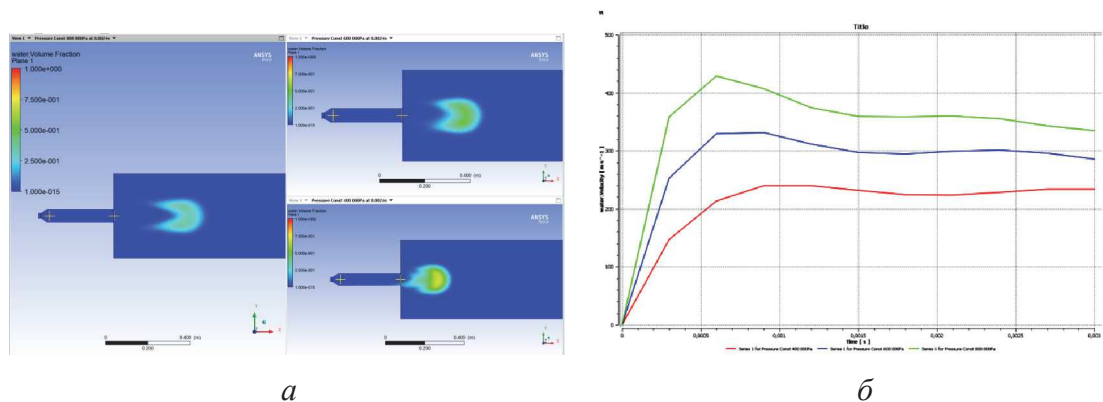


Рисунок 3.

- a* – гидродинамические характеристики ствола ($\rho; v; v_{ж}/v_{г}$) в момент времени $t = 0.0024$ с при скорости подачи распыливающего сжатого газа более 100 м/с;
- б* – графики изменения давления движения огнетушащей жидкости на выходе (оси) из ствола УИП (скорость подачи распыливающего газа > 100 м/с)

Ввиду того, что скорость истечения жидкости из стволов УИП изменяется во времени, при использовании УИП возможен распад истекающей струи в нескольких режимах.

Следует отметить, что компьютерное моделирование показало, что осесимметричное волновое распыление появляется при скоростях распыливающего сжатого газа порядка до 100 м/с; турбулентно-пульсационное – 100–200 м/с, а инерционное – свыше 200 м/с (в виде облака водяной пыли).

На базе компьютерного моделирования процесса истечения огнетушащей жидкости из ствола УИП с использованием уравнения Рейля-Плессета установлены границы режимов распада струи. Причем при скоростях движения распыливающего сжатого газа от 30 до 100 м/с наблюдается режим волнообразного распада распыливаемой жидкости (Рис. 2.), который сопровождается появлением капель со средним диаметром 250–750 мкм; при скоростях сжатого газа 100–200 м/с – турбулентно-пульсационное распыление со средним диаметром капель от 100 до 500 мкм; при скоростях сжатого газа свыше 200 м/с наблюдается тонкодисперсный (10–100 мкм) распад двухфазного потока жидкости на капли под действием кавитации и внешних инерционных сил, действие которых обусловлено трением между струями газа и жидкости, непосредственно в плоскости выходного отверстия, сопровождающиеся тонкодисперсным облаком водяной «пыли».

При практическом использовании СП-И УИП для тушения пожаров основные механизмы прекращения горения воды и составов на ее основе наиболее полно реализуются при прохождении капель распыленной струи через пламя, нагретые продукты сгорания и при непосредственном контакте с поверхностью горящего вещества. Поэтому найденные путем компьютерного моделирования гидродинамические характеристики распада и распыления огнетушащей жидкости позволяют найти оптимальные количественные рабочие параметры стволов УИП для тушения пожаров различной категории сложности.

ЛИТЕРАТУРА

1. ANSYS FLUENT12.0 Theory Guide, April 2009. ANSYS Inc.
2. Альтшуль, А.Д. Гидравлика и аэродинамика: учеб. для вузов / А.Д. Альтшуль, Л.С. Животовский, Л.П. Иванов. – М.: Стройиздат, 1987. – 413 с.