

**Численное моделирование истечения огнетушащей жидкости из ствола установки импульсного пожаротушения**

Дмитриченко А. С.<sup>1</sup>, Качанов И. В.<sup>2</sup>, Кудин М. В.<sup>3</sup>, Шаталов И. М.<sup>2</sup>,  
Щербакова М. К.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет»

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>3</sup>Белорусская государственная академия авиации  
Минск, Республика Беларусь

*В статье представлены результаты теоретического и компьютерного моделирования истечения огнетушащей жидкости на выходе из ствола установки импульсного пожаротушения (УИП).*

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, проведенный во время выполнения плановой научно-технической работы ГБ 15-153 «Разработка методики определения гидродинамических характеристик истечения жидкости из стволов установок импульсного пожаротушения» по заданию 2.2.51 п.8 ГПНИ «Информатика и космос, научное обеспечение безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций» в 2015 г., показал, что, несмотря на широкое распространение технологий импульсного пожаротушения, в настоящее время отсутствуют научно обоснованные методики, позволяющие определить быстрдействие 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.

Компьютерное моделирование формирования и движения распыленной огнетушащей жидкости на выходе из ствола УИП проводилось 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

$$\left\{ \begin{array}{l} -grad p' + \mu' \nabla^2 \vec{\omega}' = \rho' \frac{D\vec{\omega}'}{dt}; div \vec{\omega}' = 0; \\ -grad p'' = \rho'' \frac{D\vec{\omega}''}{dt}; div \vec{\omega}'' = 0; \\ \mu' \left( \frac{\partial \omega'_i}{\partial x_k} + \frac{\partial \omega'_k}{\partial x_i} \right)_{гр} = -\rho'' (\vec{v}''_i \vec{v}''_k)_{гр}; \\ p' - 2\mu' \left( \frac{\partial \omega'_k}{\partial x_k} \right)_{гр} = p'' - \rho'' (\vec{v}''_k)_{гр} + \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right); \\ \vec{\omega}'_{гр} = \vec{\omega}''_{гр} \end{array} \right. \quad (1)$$

и уравнения динамики пузырька Релея-Плессета

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

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 Schnegg-Saner [1].

В процессе моделирования постоянно менялась скорость подачи распыливающего сжатого газа в пределах от 5 до 300 м/с и выше (до 1000 м/с).

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

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

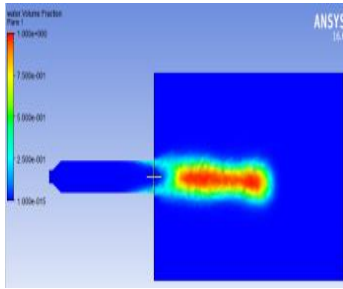
$$We'' = 266 \left( \frac{\mu_{ж}^2}{\rho_{ж} d_0 \sigma_{ж}} \right)^{0,133} \left( \frac{\rho_{ж}}{\rho'_{г}} \right)^{0,8} \quad (4)$$

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

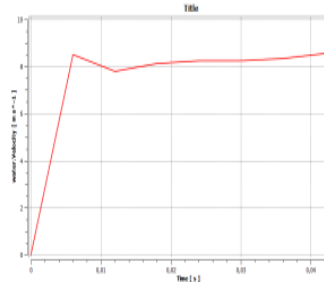
Результаты компьютерного моделирования приведены на рис. 1–3.

Анализ результатов численного моделирования показал, что когда критерий Вебера  $We < We'$ , происходит осесимметричное волновое распыление струи (рис. 1); если  $We' \leq We < We''$ , происходит турбулентно-пульсационное распыление (рис. 2), и при  $We \geq We''$  наблюдается инерционное распыление струи с возможной кавитацией (рис. 3).

Компьютерное моделирование показало, что осесимметричное волновое распыление появляется при скоростях распыливающего сжатого газа порядка до 100 м/с, турбулентно-пульсационное – 100–300 м/с, а инерционное – свыше 300 м/с (в виде облака водяной пыли).



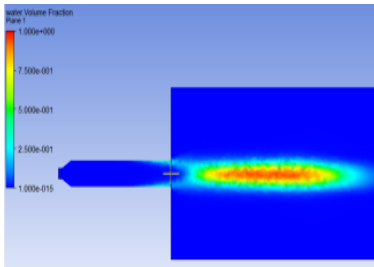
*a*



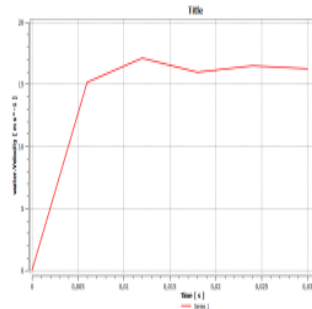
*б*

Рис. 1. Изменение формы и скорости движения огнетушащей струи на выходе из жидкостной камеры СПИ при скорости подачи распыливающего сжатого газа 50 м/с:

*a* – формирование струи огнетушащей жидкости на выходе из жидкостной камеры ствола УИП, *б* – график изменения во времени скорости движения огнетушащей струи (на оси ствола) на выходе из жидкостной камеры ствола УИП



*a*



*б*

Рис. 2. Изменение формы и скорости движения огнетушащей струи на выходе из жидкостной камеры СПИ при скорости подачи распыливающего сжатого газа 100 м/с:

*a* – формирование струи огнетушащей жидкости на выходе из жидкостной камеры ствола УИП, *б* – график изменения во времени скорости движения огнетушащей струи (на оси ствола) на выходе из жидкостной камеры ствола УИП

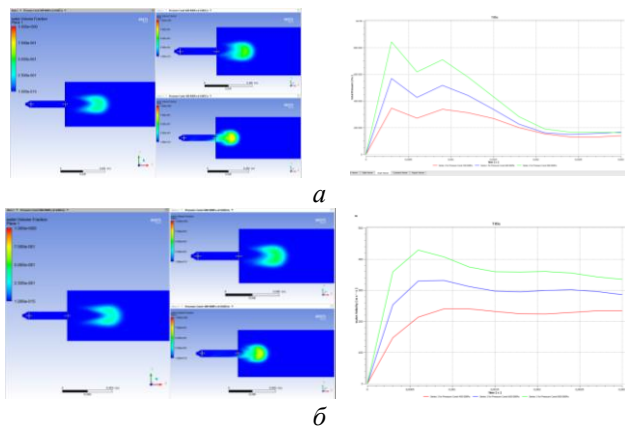


Рис. 3. Графики изменения скорости и давления движения огнетушащей жидкости на выходе (оси) из ствола УИП (скорость подачи распыливающего газа более 100 м/с):  
*а* – гидродинамические характеристики ствола ( $\rho; v; v_{ж}/v_r$ ) в момент времени  $t = 0,0021$  с; *б* – гидродинамические характеристики ствола ( $\rho; v; v_{ж}/v_r$ ) в момент времени  $t = 0,0024$  с

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

На базе компьютерного моделирования процесса истечения огнетушащей жидкости из ствола УИП с использованием уравнения Рейля-Плессета установлены границы режимов распада струи. При скоростях движения распыливающего сжатого газа от 50 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 100–300 м/с – турбулентно-пульсационное распыление со средним диаметром капель от 100 до 500 мкм; при скоростях сжатого газа свыше 300 м/с наблюдается тонкодисперсный (10–100 мкм) распад двухфазного потока жидкости на капли под действием кавитации и внешних инерционных сил непосредственно в плоскости выходного отверстия, сопровождающиеся тонкодисперсным облаком водяной «пыли».

При практическом использовании СПИ УИП для тушения пожаров основные механизмы прекращения горения с помощью воды и составов на ее основе наиболее полно реализуются при прохождении капель распыленной струи через пламя. Найденные путем компьютерного моделирования гидродинамические характеристики распада и распыления огнетушащей жидкост-

ти позволяют определить 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 / А. Д. Альтшуль, Л. С. Животовский, Л. П. Иванов. – М.: Стройиздат, 1987. – 413 с.

УДК 614.843.3

### **Численное моделирование движения огнетушащей жидкости в проточной части установки импульсного пожаротушения (УИП)**

Дмитриченко А. С.<sup>1</sup>, Качанов И. В.<sup>2</sup>, Кудин М. В.<sup>3</sup>,  
Шаталов И. М.<sup>2</sup>, Щербакова М. К.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>3</sup>Белорусская государственная академия авиации

Минск, Республика Беларусь

*В статье представлены результаты теоретического и компьютерного моделирования движения огнетушащей жидкости в проточной части установки импульсного пожаротушения.*

Вода на настоящий момент является одним из самых распространенных средств пожаротушения. До 90 % всех пожаров ликвидируется именно водой, и это наиболее простой, экологически чистый и дешевый способ [1, 2]. Традиционное оборудование (например, пожарные стволы) имеет ряд недостатков, основным из которых является нанесение значительного ущерба вследствие применения чрезмерного количества воды.

В настоящее время все большее внимание уделяется повышению эффективности тушения водой за счет уменьшения подаваемого удельного расхода и увеличению степени использования огнетушащего вещества (ОТВ). Это достигается использованием при тушении пожаров распыленной воды (РВ) и составов на ее основе, подаваемых к месту пожара различными системами, установками и устройствами. Например, установками импульсного пожаротушения (УИП), в состав которых входит ствол пожаротушения импульсный (СПИ). На кафедре ГЭСВТГ БНТУ в 2015 г. было выполнено научно-техническое исследование установок импульсного пожаротушения в рамках ГБ 15-153 «Разработка методики определения гидродинамических характеристик истечения жидкости из стволов установок импульсного пожаротуше-