

УДК [614.842.612 : 614.843.4] + 52-17

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ОГнетушаЩЕГО Вещества ПО ПРОТОЧНОМУ ТРАКТУ ВОДОПЕННОГО НАСАДКА

Камлюк А.Н.*, к.ф.-м.н., доцент, Ширко А.В.***, к.ф.-м.н., Грачулин А.В.*,
Нгуен Донг Ань***, д.ф.-м.н., Чан Дык Хоан*

*Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

**Белорусский государственный технологический университет

***Институт механики Вьетнамской академии наук и технологий

e-mail: Grachulin_A@mail.ru

В работе методом конечных элементов описано движение огнетушащего вещества по проточному тракту водопенного насадка с целью оптимизации его геометрических параметров. Показана общая структура проекта, определена расчетная область и сформулированы граничные условия численного моделирования. Определены и проанализированы характеристики потока огнетушащего вещества по проточному тракту водопенного насадка, по которым можно судить о возникновении процесса кавитации и степени его влияния. Предложены возможные пути улучшения характеристик водопенного насадка.

We present a description of the motion of the extinguishing agent in flow path of water-foam nozzle in order to optimize its geometrical parameters by finite element method. Shows the general structure of the project, defined a computational domain and formulated boundary conditions of numerical simulation. Determined and analyzed the flow characteristics of the extinguishing agent in flow path of water-foam nozzle by which we can conclude the appearance of cavitation process and the extent of his influence. Offered the possible ways to improve the characteristics of water-foam nozzle.

(Поступила в редакцию 14 декабря 2015 г.)

Введение. Пожары для современного общества являются глобальным бедствием, несущим как людские смерти, так и огромный материальный и экологический ущерб. Чтобы качественно бороться с пожарами, необходимо иметь надежные средства пожаротушения, соответствующие современным требованиям безопасности. Также необходимо проводить исследования в области модернизации и развития пожарной техники, разработки новых методов, подходов и средств ликвидации пожаров.

Самым распространенным огнетушащим веществом является вода, но эффективный расход воды при тушении пожаров составляет не более 10-20 %. Из-за высокого поверхностного натяжения вода обладает низкой смачивающей способностью, вследствие чего быстро стекает с горящих объектов, и значительная часть ее не участвует в процессе тушения. В связи с этим приходится увеличивать интенсивность подачи и расход воды в процессе тушения, что приводит к сопутствующему экологическому ущербу из-за переноса водой вредных и отравляющих веществ в почву.

Возможности повышения огнетушащей способности воды, и как следствие уменьшения ее расхода, могут быть связаны с обоснованным выбором оптимальной дисперсности распыленных струй воды, снижения поверхностного натяжения и повышения смачивающей способности воды. Этого можно достичь использованием универсальных пожарных стволов, которые при подаче воды позволят создать струи мелкодисперсной воды, а при подаче раствора воды с пенообразователем на основе поверхностно-активных веществ – пену низкой кратности.

Современные тенденции развития технологии и техники в ракурсе растущей угрозы техногенных аварий, несущих за собой возможности больших людских потерь и экологических катастроф, требуют использования универсальных безопасных и надежных средств ликвидации техногенных аварий с минимальными последствиями, как для экономики, так и экологии.

Как в Республике Беларусь, так и в Социалистической Республике Вьетнам в настоящее время при тушении пожаров широко используются пожарные стволы РСК-50, дос-

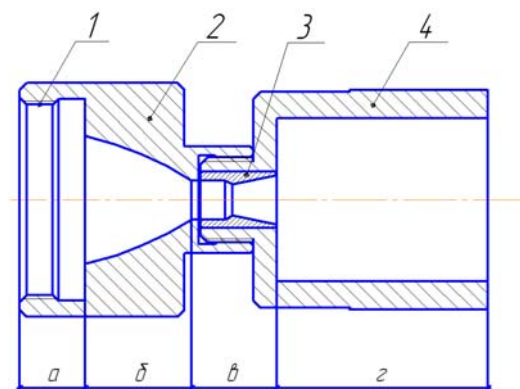
тавшие указанные государствам еще со времен СССР. Данный тип ствола предназначен для формирования и направления компактной или распыленной с постоянным углом факела струи воды или раствора смачивателя в очаг пожара. Ствол пожарный ручной СРК-50 входит в комплект всех пожарных автомобилей, применяется в районах с умеренным, холодным и тропическим климатом. Одним из существенных недостатков данного типа стволов является неспособность образовывать пену низкой кратности, что значительно уменьшает эффективность тушения возгораний ЛВЖ, ГЖ и т. д.

В связи с широким распространением данного ручного ствола как в Республике Беларусь, так и Социалистической Республике Вьетнам, авторами предлагается водопенный насадок [1], устанавливаемый вместо струеобразующего насадка на ручной пожарный ствол СРК-50, который позволит подавать в очаг пожара струи мелкодисперсной воды или пену низкой кратности.

Принцип действия водопенного насадка основан на явлении кавитации. При возникновении кавитации в потоке жидкости происходит образование, рост и схлопывание кавитационных микрокаверн. Их схлопывание происходит по типу микровзрывов, при этом в потоке жидкости возникают знакопеременные пульсации местных давлений и скоростей, образование кумулятивных микроструй. Все эти факторы способствуют улучшению качества распыливания, образованию мелкодисперсной распыляемой среды, что в свою очередь обеспечивает создание пены низкой кратности. Использование съемного водопенного насадка значительно расширит тактико-технические возможности ручного пожарного ствола СРК-50 при невысокой себестоимости самого насадка, а также уменьшит расход воды и как следствие экологический ущерб.

Данная работа направлена на оптимизацию параметров водопенного насадка [1], конструктивные особенности которого позволят генерировать однородные мелкодисперсные струи воды или пену низкой кратности.

Постановка задачи. Задача моделирования заключается в численном описании движения огнетушащего вещества по проточному тракту водопенного насадка при заданных (исходных) параметрах: избыточном давлении потока на входе в насадок, геометрических размерах проточного тракта и расходе огнетушащего вещества. Модель должна обеспечить определение оптимальных параметров водопенного насадка для возникновения кавитации, которая позволит получить пену кратностью не менее 10. Для этого необходимо определить геометрические размеры проточного тракта водопенного насадка. Расчетная модель насадка представлена на рисунке 1.



1 – присоединительная резьба; 2 – основание; 3 – сопло; 4 – корпус

Рисунок 1 – Расчетная модель водопенного насадка [1]

Проточный тракт водопенного насадка выполнен в виде последовательно расположенных участков различной конфигурации: **а** – цилиндрический участок с резьбой для присоединения к СРК-50, **б** – участок сферического сужения, **в** – сопло, **г** – цилиндрический участок корпуса. Диаметр узкого сечения сопла является наиболее узкой частью проточного тракта и определяет пропускную способность водопенного насадка.

Задача решается с помощью моделирования процесса течения жидкости через проточный тракт водопенного насадка. Решение строится с помощью метода конечных элементов. Общая структура проекта в среде Ansys Workbench показана на рисунке 2.

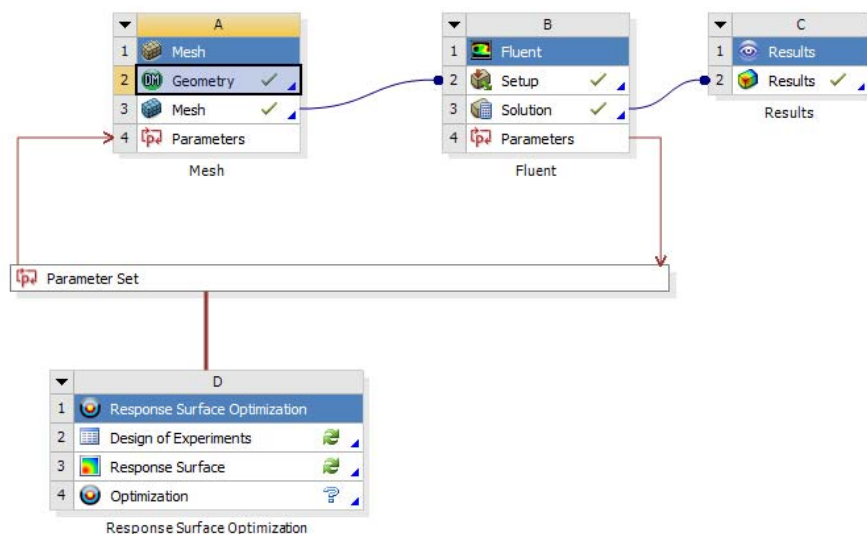


Рисунок 2 – Общая структура проекта

Процесс моделирования разбит на следующие этапы:

- 1) построение параметризированной геометрической модели проточного тракта водопенного насадка,
- 2) построение сетки конечных элементов, имеющей необходимый размер элементов в пристеночных областях для явного разрешения пограничного слоя (без использования пристеночных функций),
- 3) задание граничных условий и численное решение уравнений многофазного течения в условиях возникающей кавитации,
- 4) оптимизация геометрических параметров по критерию достижения максимальной газонасыщенности потока жидкости на выходе из проточного тракта водопенного насадка,
- 5) анализ полученных результатов,
- 6) исследование рабочих характеристик водопенного насадка.

Геометрическая модель. Задача решалась в осесимметричной постановке. При создании геометрической модели были параметризованы основные геометрические размеры для последующего проведения оптимизации. Помимо непосредственно геометрии канала, необходимо обеспечить зону свободного выхода струи жидкости в атмосферу. Геометрическая модель проточного тракта водопенного насадка в осесимметричной постановке показана на рисунке 3.

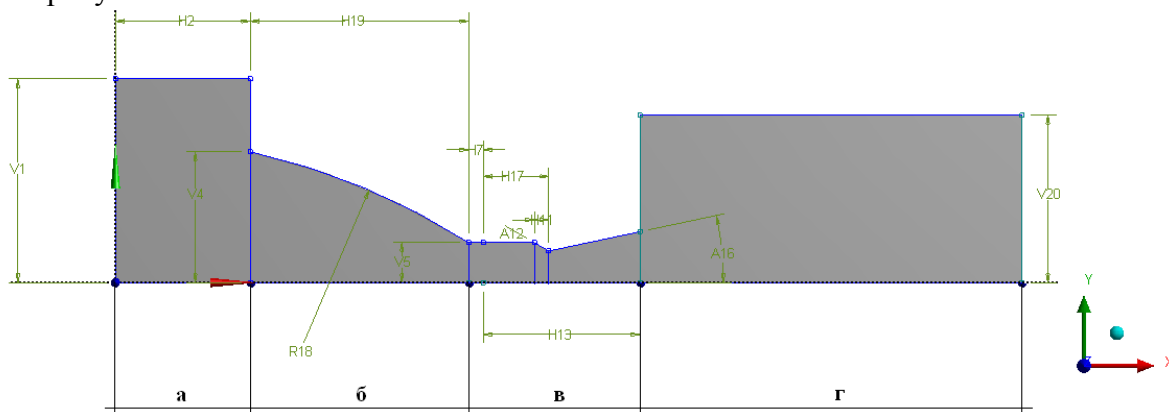


Рисунок 3 – Геометрическая модель проточного тракта водопенного насадка в осесимметричной постановке задачи

В качестве параметров, подлежащих оптимизации, используются: входной диаметр основания и степень, диаметр проточного тракта, радиусы его скругления. Пример задания входных и выходных параметров показан на рисунке 4.

Outline of All Parameters				
	A	B	C	D
1	ID	Parameter Name	Value	Unit
2	[-] Input Parameters			
3	[-] Mesh (A1)			
4	[P] P24	h	3	mm
5	[P] P25	D	9,5	mm
6	[P] P26	Def	10	mm
7	[P] P27	S_def	5	mm
8	[P] P28	fakel	15	mm
9	[P] P35	ugol	30	degree
*	[P] New input parameter	New name	New expression	
11	[+] Output Parameters			
12	[+] Fluent (B1)			
13	[P] P29	mass_flow	6,2718	kg s ⁻¹
14	[P] P30	vel	33,321	m s ⁻¹
15	[P] P31	in_press_st	6,9678E+05	Pa
16	[P] P32	in_press_dyn	12501	Pa
17	[P] P33	in_press_tot	7,0928E+05	Pa
18	[P] P34	out_press_tot	5,4966E+05	Pa
19	[P] P15	%	22,503	

Рисунок 4 – Входные и выходные параметры задачи

При изменении какого-либо параметра или набора параметров программа в автоматическом режиме перестраивает всю геометрию проточного тракта водопенного насадка.

Построение сетки конечных элементов. С целью описания движения огнетушащего вещества по проточному каналу водопенного насадка необходимо обеспечить явное разрешение пристеночной области. Для этого строится структурированная сетка конечных элементов. Размер первой ячейки определим по формуле

$$y = \frac{y^+ \mu}{U_\tau \rho}, \quad (1)$$

где y^+ – параметр, принимаемый для используемой модели турбулентности, ρ – плотность среды, μ – динамическая вязкость среды, U_τ – скорость сдвига. Для воды $\rho = 998 \text{ кг/м}^3$, $\mu = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$.

Оценим число Рейнольдса:

$$\text{Re}_d = \frac{\rho U_{cp} d_\Gamma}{\mu} = \frac{998 \cdot 20 \cdot 11 \cdot 10^{-3}}{10^{-3}} = 219\,560, \quad (2)$$

где d_Γ – гидравлический диаметр проточного канала, примем 11 мм, U_{cp} – средняя скорость в потоке, примем 20 м/с.

Сдвиговые напряжения у стенки:

$$\tau_w = \frac{1}{2} C_f \rho U_{cp}^2 = \frac{1}{2} 0,0036 \cdot 998 \cdot 20^2 = 718,56 \text{ Па}, \quad (3)$$

где C_f – коэффициент трения, который определяется по формуле

$$C_f = 0,079 \text{Re}_d^{-0,25} = 0,079 \cdot (219560)^{-0,25} = 0,0036. \quad (4)$$

Скорость сдвига равна

$$U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = \sqrt{\frac{718,56}{998}} = 0,85 \text{ м/с}. \quad (5)$$

Приняв значение параметра $y^+ = 1$, определим размер первой ячейки по формуле (1) $y = 0,0012$ мм. По рассчитанному размеру первой ячейки строится структурированная сетка конечных элементов. Пристеночная область состоит из 20 слоев, ширина которых постепенно возрастает от 0,0012 мм. Сетка имеет 72 тыс. конечных элементов и 42 тыс. узлов. Средний размер элемента составляет 0,3 мм. Конечные элементы имеют тетрагональную форму.

Граничные условия и уравнения модели. Методом конечных элементов в *Ansys Fluent* численно решаются базовые уравнения гидрогазодинамики, которые представляют собой систему дифференциальных уравнений, имеющую бесконечное множество решений. Для того чтобы получить искомое решение системы, соответствующее рассматриваемому физическому процессу, необходимо задать граничные условия (рисунок 5).

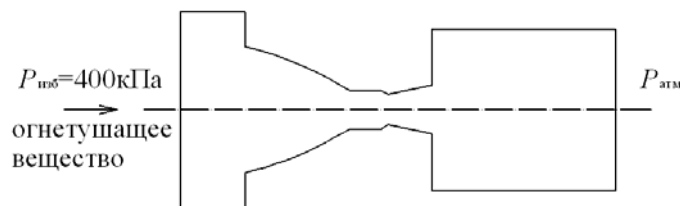


Рисунок 5 – Граничные условия численного моделирования

Таким образом, принимаем, что на входе в проточный тракт водопенного насадка подается огнетушащее вещество с избыточным давлением 400 кПа, а на выходе из проточного тракта водопенного насадка давление атмосферное, среда – воздух.

Исходя из рассчитанного значения числа Рейнольдса по (2), принимаем, что движение жидкости по проточному тракту водопенного насадка является турбулентным. Течение жидкости описывается системой уравнений Навье-Стокса [2], в состав которой входят: уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0, \quad (6)$$

уравнение движения:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i, \quad (7)$$

где p – давление; τ_{ij} – компоненты тензора сдвиговых напряжений; ρg_i – компонента вектора гравитации, F_i – внешние поверхностные силы.

Для описания турбулентного движения используем модель на основе осреднения по Рейнольдсу (*Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS*). Исходные уравнения (6) и (7) осредняют по всему спектру пульсаций, после чего в них появляются неизвестные корреляции пульсирующих величин, так называемые рейнольдсовы (турбулентные) напряжения, без определения которых осредненные уравнения не могут быть решены.

Таким образом, решение задачи сводится к определению рейнольдсовых напряжений. Для моделирования турбулентного течения огнетушащего вещества в проточном тракте водопенного насадка используем SST модель (Shear Stress Transport model) [3], которая, как показал опыт, приводит к лучшему согласию с результатами экспериментальных исследований на данном классе течений. SST модель основана на линейной комбинации $k-\omega$ модели Вилкокса в пристеночных областях и $k-\epsilon$ модели вдали от стенок [4]. Данная модель хорошо зарекомендовала себя в расчетах отрывных течений с небольшой зоной отрыва.

Анализ результатов. На рисунке 6 показаны линии тока, раскрашенные в зависимости от численных значений скорости потока, а на рисунке 7 – поле статического давления в проточном тракте водопенного насадка.

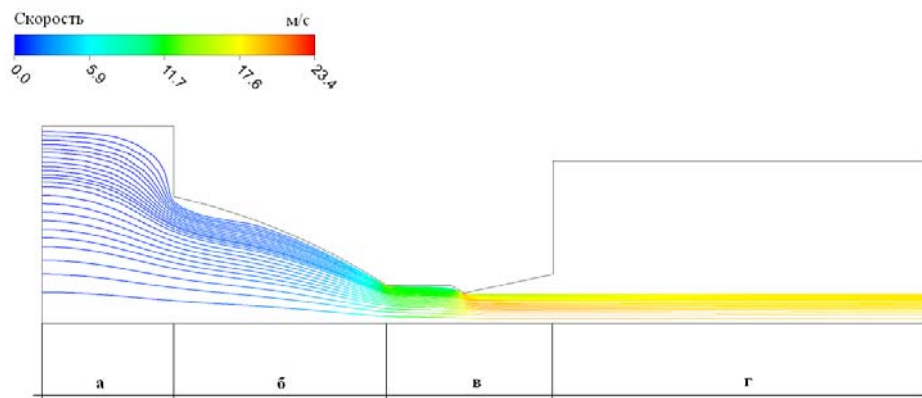


Рисунок 6 – Линии тока

Скорость потока (рисунок 6) меняется от 3 м/с на входе в водопенный насадок до 21 м/с на выходе из него. В момент прохождения огнетушащего вещества через сопло водопенного насадка (самую узкую часть проточного тракта) скорость возрастает в 7 раз по сравнению с начальным значением.

На рисунке 7 показано поле статического давления в проточном тракте водопенного насадка, а на рисунке 8 – изменение статического давления вдоль линий тока.

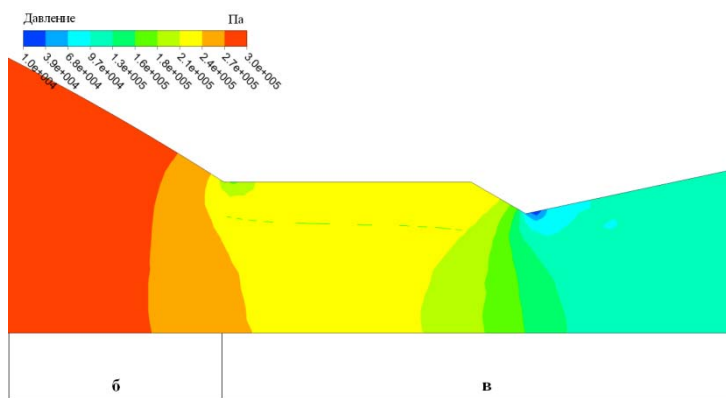


Рисунок 7 – Поле статического давления в проточном тракте водопенного насадка

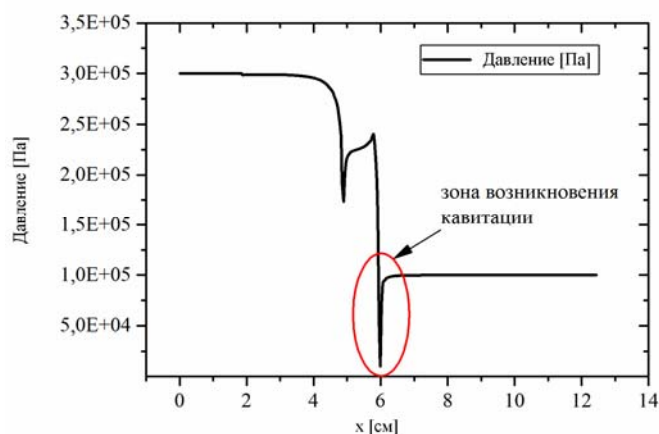


Рисунок 8 – Величина статического давления вдоль линий тока

По рисункам 7 и 8 можно судить о возникновении процесса кавитации в проточном тракте водопенного насадка. На рисунке 8 начало отсчета оси X соответствует началу участка а проточного тракта водопенного насадка, а X = 6 см – самому узкому сечению сопла. Как показывают результаты численного моделирования, зона кавитации появляется только

в самом узком сечении сопла, причем ее размеры очень малы. На основании этого можно сделать вывод о незначительном влиянии кавитации на газонасыщение потока огнетушащего вещества, и как следствие на кратность генерируемой пены.

Это подтверждается рисунком 9, на котором показано сопло водопенного насадка и объемная доля водяного пара, выделившегося в результате кавитации, в самом узком сечении сопла.

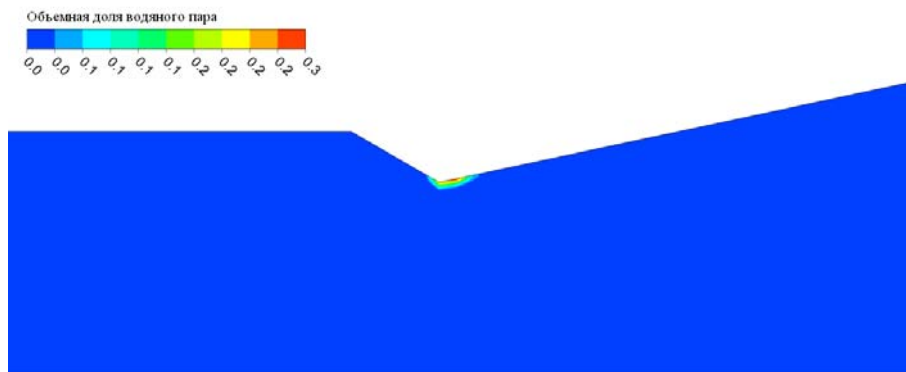


Рисунок 9 – Объемная доля водяного пара в сопле водопенного насадка

Судя по рисунку 9, объемная доля водяного пара в зоне кавитации составляет 30 %, но при рассмотрении потока огнетушащего вещества в целом, объемная доля водяного пара много меньше. Таким образом, можно полагать, что кавитация обеспечит на выходе из водопенного насадка подачу пены низкой кратности, однако ее значение будет достаточно малым (менее 10) из-за небольшого выделения водяного пара. Для повышения значения кратности пены до значений 10 и выше можно пойти по одному из следующих путей. Первый вариант заключается в изменении геометрии проточного тракта (уменьшение диаметра и увеличение длины сопла) водопенного насадка, что позволит увеличить зону кавитации. Второй вариант подразумевает дополнить проектируемое устройство элементами, которые будут способствовать повышению величины кратности пены, например, выполнить отверстия в корпусе для подсоса через них воздуха внутрь насадка, а также разместить металлическую сетку на выходе из водопенного насадка.

Первый вариант приведет к значительному увеличению сопротивления водопенного насадка и уменьшению расхода огнетушащего вещества. Помимо того, это приведет к существенному увеличению геометрических размеров водопенного насадка, что сделает его неудобным при эксплуатации. По этим причинам наиболее оптимальным вариантом является второй. В этом случае, небольшая объемная доля водяного пара, выделившегося в результате кавитации в потоке огнетушащего вещества, будет дополнена воздухом из окружающей среды через выполненные в корпусе водопенного насадка отверстия.

Об эффективности применения воздухомасывания раствора воды с пенообразователем через отверстия в корпусе свидетельствуют результаты экспериментальной работы [5], в которой рассмотрено влияние предварительного воздухомасывания пенообразующего раствора на характеристики пены, генерируемой в автоматических установках пожаротушения. Результаты исследования показали повышение значения кратности пены за счет воздухомасывания на величину до 40 % по сравнению со случаем без воздухомасывания. Можно полагать, что подобный эффект будет способствовать повышению значений кратности пены и в случае водопенного насадка с отверстиями в корпусе. Окончательное формирование структуры потока будет происходить на сетке, которая, при прохождении раствора воды с пенообразователем, позволит более интенсивно надувать пузырьки [6]. В этих условиях можно рассчитывать на получение пены низкой кратности со значением не ниже $K = 10$. Для подтверждения сделанных предположений необходимо провести серию экспериментов и определить влияние различных факторов на количественные характеристики водопенного насадка и качественные характеристики генерируемой пены.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фон-

да фундаментальных исследований в рамках выполнения международного гранта Ф15В–003 совместно с Вьетнамской академией наук и технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кавитационный водопенный насадок пожарного ствола: пат. 10841 U Респ. Беларусь, МПК7 А 62С 31/12 / А.Н. Камлюк, А.В. Грачулин, Чан Дык Хоан; заявитель КИИ МЧС Республики Беларусь – № и 20150140; заявл. 2015.04.27; опубл. 2015.10.30 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2015. – № 5. – С. 107.
2. Белов, И.А. Моделирование турбулентных течений: Учебное пособие / И.А. Белов, С.А. Исаев – СПб., Балт. гос. техн. ун-т., 2001. – 108 с.
3. Menter, F.R. Zonal two equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows / Proc. 24th Fluid Dynamics Conference. – Florida, 1993. – P. 1993-2906.
4. Ильина, Е.Е. Применимость различных дифференциальных моделей турбулентности при численном расчете сверхзвуковых неизобарических струй / Е.Е. Ильина, Т.Е. Ильина, П.В. Денисенко // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – Т. 15. № 3(97). – С. 509-516.
5. Качанов, И.В. О влиянии предварительного газонасыщения пенообразующего раствора на характеристики пены, генерируемой в автоматических установках пожаротушения / И.В. Качанов, В.В. Кулебякин, С.Ю. Павлюков // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2015. – № 2(22). – С. 52-60.
6. Камлюк, А.Н. Экспериментальные исследования опытных образцов водопенного насадка / А.Н. Камлюк [и др.] // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2015. – № 2(22). – С. 61-67.