

*The models of the surveillance and reporting asset operator actions and surveillance and reporting asset automated workstation are formalized. The structure charts of the operator's cooperation with the hardware and software system of the surveillance and reporting asset and methods of the operator's functional status estimation are defined.*

*Key words: model, operator, information, application, functional status.*

*Abramov Pavel Ivanovich, candidate of technical science, executive director, [mail@shvabe.com](mailto:mail@shvabe.com), Russia, Moscow, JSC "Shvabe researches",*

*Yesikov Oleg Vitalyevich, doctor of technical science, chief specialist, [rts@cdbae.ru](mailto:rts@cdbae.ru), Russia, Tula, JSC Central Design Bureau of Apparatus Engineering,*

*Melnik Sergey Ivanovich, lecturer, [rts@cdbae.ru](mailto:rts@cdbae.ru), Russia, Tyumen, Higher Military Engineering Command School,*

*Filipchenkov Viktor Ivanovich, engineer, [rts@cdbae.ru](mailto:rts@cdbae.ru), Russia, Tula, JSC Central Design Bureau of Apparatus Engineering*

УДК 532.522

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИСТЕЧЕНИЯ СЖАТОГО ГАЗА ИЗ ЕМКОСТИ КОНЕЧНОГО ОБЪЕМА**

**С.М. Кабанов, Г.В. Фридлиндер**

*Рассмотрена задача истечения газа из баллона высокого давления конечного объема. Проведено численное моделирование процесса истечения газа из баллона. Получены аналитически зависимости изменения параметров газа от времени. Проведен сравнительный анализ результатов, полученных в процессе численного моделирования с результатами аналитической модели.*

*Ключевые слова: истечение газа, турбулентность, k-ε модель, термодинамическая модель, OpenFOAM.*

**1. Постановка задачи.** В ходе работы моделировалось истечение сжатого газа (азота) из баллона конечного объема. Баллон имеет следующие характеристики: длина баллона, считая от патрубка, 1000 мм, диаметр баллона равен 466 мм, переходная часть - 150 мм, диаметр патрубка - 20 мм. Предполагается, что газ внутри баллона находится под давлением 200 атм и при температуре 273 К. Газ, при открытии вентиля баллона, истекает в среду со следующими параметрами: давление 1 атм, температура 273 К.

## 2. Численная модель

### 2.1. Стандартная модель турбулентности $k - \varepsilon$

Стандартная модель турбулентности  $k - \varepsilon$  получается из уравнения Навье-Стокса, уравнения неразрывности и уравнения Рейнольдса (уравнения (1) – (3), соответственно) путем алгебраических преобразований и имеет вид (4) [5,4]

$$\frac{d\vec{u}}{dt} = -(\vec{u}\nabla)\vec{u} - \frac{1}{\rho}\nabla\vec{p} + \nu\Delta\vec{u} + \vec{f}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \text{div}(\rho\vec{u}) = 0, \quad (2)$$

$$\rho\left(\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j}\right) = \rho\bar{g}_i + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\sigma}_{ij} - \rho\bar{u}_i'\bar{u}_j'), \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k\bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_k, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon\bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon. \end{cases} \quad (4)$$

В системе уравнений (4)  $G_k$  представляет турбулентную кинетическую энергию, образованную от средних градиентов скорости

$$G_k = \mu_t S^2, \quad (5)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (6)$$

$\rho$  - плотность газа;  $C_\mu = \text{const}$ ;  $S$  - инвариант тензора деформаций;  $G_b$  - кинетическая энергия выталкивающей силы,

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}, \quad (7)$$

где  $Pr_t$  - турбулентная постоянная Прандтля для энергии;  $g_i$  - компонента вектора ускорения свободного падения в  $i$ -ом направлении;  $\beta$  - коэффициент температурного расширения:

$$\beta = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial\rho}{\partial T} \right)_p \quad (8)$$

где  $T$  - температура;  $C_{3\varepsilon}$  - константа, определяющая воздействие выталкивающей силы на диссипацию

$$C_{3\varepsilon} = \tanh\left|\frac{v'}{u'}\right| \quad (9)$$

Здесь  $v'$  и  $u'$  - компоненты скорости жидкости, параллельная и перпендикулярная скорости гравитации, соответственно;  $Y_M$  - вклад переменного расширения при турбулентности сжатия в общую скорость диссипации

$$Y_M = 2\rho\varepsilon M_t^2 \quad (10)$$

где  $M_t$  - число Маха для турбулентной жидкости, определяемое выражением

$$M_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}} \quad (11)$$

$a$  - скорость звука,  $a = \sqrt{\gamma RT}$ .

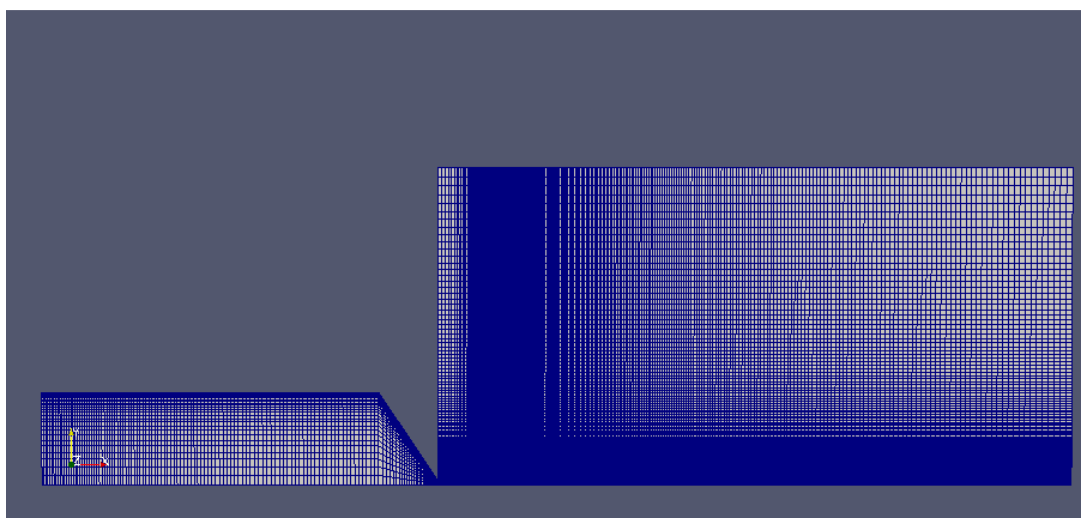
Остальные константы модели определены из экспериментом для фундаментальных турбулентных жидкостей и имеют следующие значения:  $C_{1\varepsilon} = 1,44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1,92$ ,  $C_\mu = 0,09$ ,  $\sigma_k = 1,44$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1,3$  [5].

## **2.2. Размер и форма расчетной области. Используемая расчетная сетка.**

Общий вид расчетной области представлен на рис. 1. Общий вид расчетной сетки представлен на рис. 2. Данная сетка генерировалась с помощью утилиты blockMesh, поэтому по типу сетка относится к блочно - гексаэдральным.



*Рис. 1. Общий вид расчетной области*



*Рис. 2. Общий вид расчетной сетки*

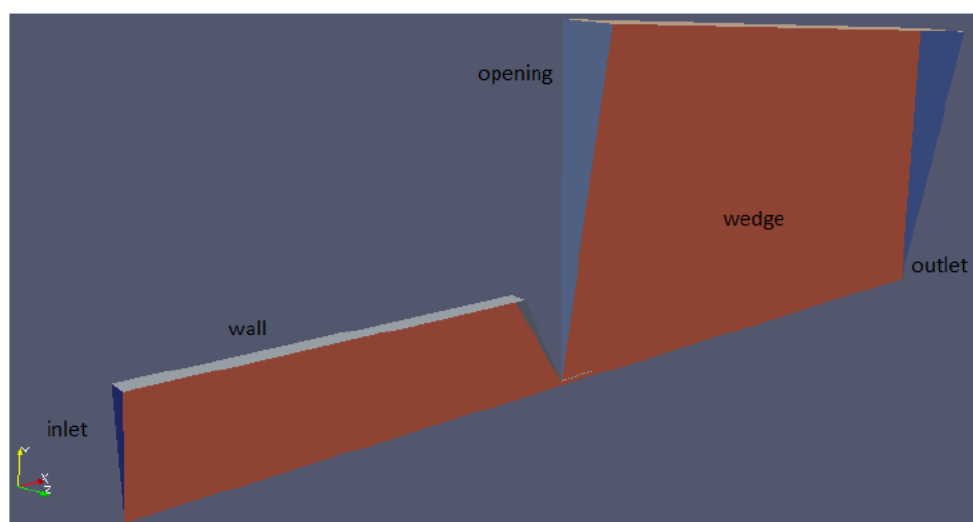
Размер сетки был откалиброван в сторону минимально допустимого количества элементов. ГУ типа wedge [6] требовали домен толщиной в одну ячейку и малым углом раскрытия (до  $1^\circ$ ). В области патрубков сетка

была дополнительно измельчена ввиду того, что в течение всего времени расчета в данной области присутствуют большие градиенты параметров потока.

**2.3. Основные параметры численной модели. Граничные условия.** Для проведения расчетов использовался стандартный решатель sonicFoam.

Для приближенного моделирования турбулентных явлений использовалась стандартная модель турбулентности  $k - \varepsilon$ , описанная в пункте 2.1. На рис. 3 показана схема расположения основных регионов, на которых задавались граничные условия для потока в соответствии с табл. 1 [6].

В качестве начального условия для расчета была выбрана область ячеек, лежащих внутри баллона с газом, и в этой области было задано давление  $p$ , равное 200 атм.



**Рис. 3. Схема граничных условий**

**Таблица 1**

**Граничные условия параметров потока**

Регион	Скорость, $U$	Давление, $p$
inlet(wall)	fixedValue(0 0 0)	zeroGradient
walls	fixedValue(0 0 0)	zeroGradient
outlet	inletOutlet	waveTransmissive
opening	inletOutlet	totalPressure
wedge1, wedge2	wedge	wedge

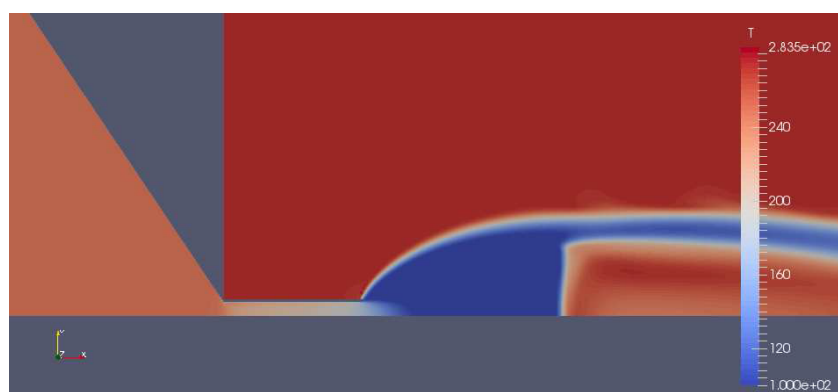
Для решения задачи численного моделирования применялись схемы первого порядка (по времени и по пространству), это в значительной мере позволяло обеспечить отличную устойчивость, хотя качественно привело к более размытым градиентам параметра потока в скачке уплотнения и на границе "струя - окружающая среда".

**2.4. Результаты численного моделирования.** Вычисления проводились на вычислительном кластере ИСП РАН с использованием облачных технологий.

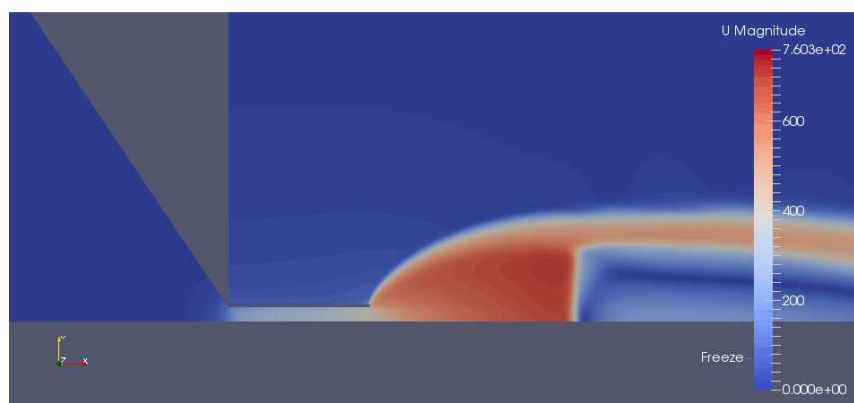
На рис. 4 – 6 показано распределение параметров газа в продольном сечении в районе патрубка, скорость, статическое давление, статическая температура соответственно, для времени истечения  $t = 1$  с.



**Рис. 4. Распределение статического давления газа  $p$  по сечению,  $t = 1$  с**



**Рис 5. Распределение статической температуры газа  $T$  по сечению,  $t = 1$  с**



**Рис. 6. Распределение скорости потока газа  $U$  по сечению,  $t = 1$  с**

### 3. Аналитическая модель.

**3.1. Основные уравнения.** При истечении газов рассматриваем одномерное движение в одном направлении под влиянием разности давления при отсутствии внешних сил. В этом случае элемент массы  $dm$ , ограниченный двумя бесконечно близкими сечениями на расстоянии  $dx$ , испытывает с одной стороны давление  $p$  в направлении потока, с другой стороны давление  $(p + dp)$  в обратном направлении. Обозначив за  $s$  сечение элемента, получим силу, действующую на массу:

$$sp - s(p + dp) = -sdp \quad (12)$$

Ускорение газа запишется следующим образом:

$$\frac{dU}{dt} = U \frac{dU}{dx} \quad (13)$$

где  $U$  - скорость движения газа. Уравнение движения запишется в виде

$$-sdp = dm \frac{dU}{dt} \quad (14)$$

Заменяя  $dm$  через плотность газа  $\rho$ , получаем:

$$dm = \rho s dx \quad (15)$$

$$-\frac{dp}{\rho} = d \frac{U^2}{2}. \quad (16)$$

Дополним последнее уравнение закон термодинамического процесса, под влиянием которого происходит движение газа. Рассмотрим политропический процесс с показателем политропы  $n$ :

$$p/\rho^n = const. \quad (17)$$

Подставляя это выражение в уравнение (16), интегрируя его и выражая скорость истечения газа из сосуда, получаем формулу Сен - Венана [1, 2]:

$$U = \sqrt{U_t^2 + \frac{2n}{n-1} \frac{p_t}{\rho_t} \left[ 1 - \left( \frac{p_a}{p_t} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]}, \quad (18)$$

где  $U_t, \rho_t, p_t$  - текущие скорость, плотность и давление газа в баллоне, усредненные по объему. Считая, что  $U_t/U = 1$ , так как на практике скорость движения газа в баллоне по порядку не превышает 1 м/с, а скорость истечения на рабочем участке сравнима с местной скоростью звука [2, 3], получим выражение для скорости истечения газа из баллона под давлением  $p_t$  в пространство с давлением  $p_a$

$$U = \sqrt{\frac{2n}{n-1} \frac{p_t}{\rho_t} \left[ 1 - \left( \frac{p_a}{p_t} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]}. \quad (19)$$

Массовый расход газа найдем согласно уравнению  $dm/dt = fU\rho_a$  [2], учитывая во внимание формулу (19) получаем

$$dm/dt = f\rho_a \sqrt{\frac{2n}{n-1} \frac{p_t}{\rho_t} \left[ 1 - \left( \frac{p_a}{p_t} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]} \quad (20)$$

где  $f$ - характеристная площадь насадка. Учитывая, что истечение газа происходит по политропическому процессу  $\rho_a = \rho_t(p_a/p_t)^{1/n}$ , выражение (20) переписывается в виде

$$dm/dt = f\phi\sqrt{p_t\rho_t}, \quad (21)$$

где функция  $\phi$  зависит от отношения давлений  $x = p_a/p_t$  и от показателя политропы  $n$  как от параметра

$$\phi(x; n) = \sqrt{\frac{2n}{n-1} \left( x^{\frac{2}{n}} - x^{\frac{n+1}{n}} \right)}. \quad (22)$$

В данной модели не учитываются потери, обусловленные трением, теплообменом и прочими факторами. Учет этих потерь производится путем выбора показателя политропы  $n = 1.1 \div 1.4$  для согласования теоретической расчетной формулы с экспериментальными данными или решением уравнения Навье-Стокса.

### 3.2 Критическое расширение газа

Максимальный массовый расход газа соответствует условию равенства нулю производной в уравнении (21) и соответствует некоторому предельному расширению газа (критическому отношению давлений). Параметры критического расширения, при котором имеет место наибольший расход, получим путем исследования функции  $\phi(x; n)$  на максимум, в результате получим параметры газа в момент критического расширения (см. рис. 1)

$$x_{cr}(n) = \left( \frac{p_a}{p_t} \right)_{cr} = \left( \frac{2}{n+1} \right)^{\frac{n}{n-1}}, \quad (23)$$

$$\phi_{max}(n) = \phi(x_{cr}) = \left( \frac{2}{n+1} \right)^{\frac{1}{n-1}} \sqrt{\frac{2n}{n+1}}. \quad (24)$$

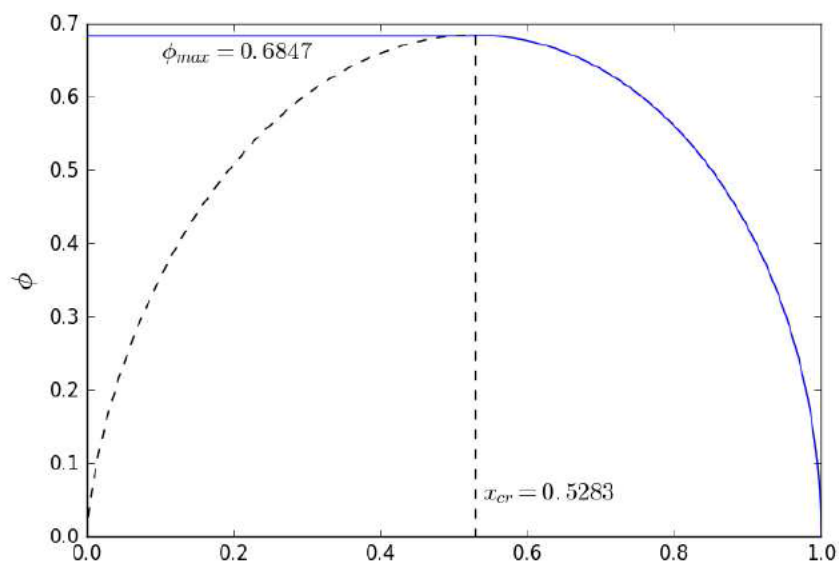


Рис. 7. Функция  $\phi$  в зависимости от  $x$  при  $n = 1,4$

Величина критического отношения давлений зависит от показателя политропы. Значения  $x_{cr}$  в зависимости от  $n$  приведены в табл. 2. Пунктирная часть кривой функции  $\phi(x)$  на практике не соответствует реальному поведению истечения газа, поэтому в области  $0 < x < x_{cr}$  значения функции  $\phi$  заменяют на ее максимальное значение  $\phi_{max}$ . В связи с этим, различают две зоны течения газа:

зона докритического течения, соответствующая условию  $0 < x < x_{cr}$  при котором функция  $\phi(x)$ , описывается зависимостью (22);

зона надкритического течения, соответствующая условию  $x_{cr} < x < 1$  при котором функция  $\phi(x)$ , описывается зависимостью (24).

Таблица 2

**Критическое отношение давлений  
при различных показателях политропы**

$n$	1.40	1.35	1.30	1.25	1.20	1.10
$x_{cr}$	0.5283	0.5369	0.5457	0.5549	0.5645	0.5847

### 3.3. Зависимость основных параметров газа от времени

Истечение газа из баллона ограниченной емкости характеризуется тем, что при ограничении объема баллона параметры истекающего газа переменны во времени и убывают до нуля при полном истечении газа. Рассмотрим процесс опорожнения баллона объемом  $V_0$  через насадок площадью  $f = \pi d^2/4$ , где  $d$  - характерный диаметр насадка. Дифференциальное уравнение истечения газа из баллона составим исходя из условия, что масса  $m$  газа, протекающее через заданное поперечное сечение отверстия за некоторый малый отрезок времени, равна изменению массы газа в баллоне за то же время

$$dm = V_0 d\rho_t, \quad (25)$$

где  $\rho_t$ -значение плотности газа в текущий момент времени. Выражая текущие параметры газа  $\rho_t$  и  $p_t$  через начальные их значение  $p_0$  и  $\rho_0$ , имевшие место в баллоне перед началом истечения, и полагая, что изменение этих параметров внутри баллона при его опорожнении подчиняется некоторой политропной зависимости с показателем политропы  $n$ :

$$\rho_t = \rho_0 \left( \frac{p_t}{p_0} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (26)$$

С учетом уравнения (26) получим

$$dm = \frac{V_0 \rho_0}{n} \left( \frac{p_t}{p_0} \right)^{\frac{1}{n}-1} d \left( \frac{p_t}{p_0} \right). \quad (27)$$

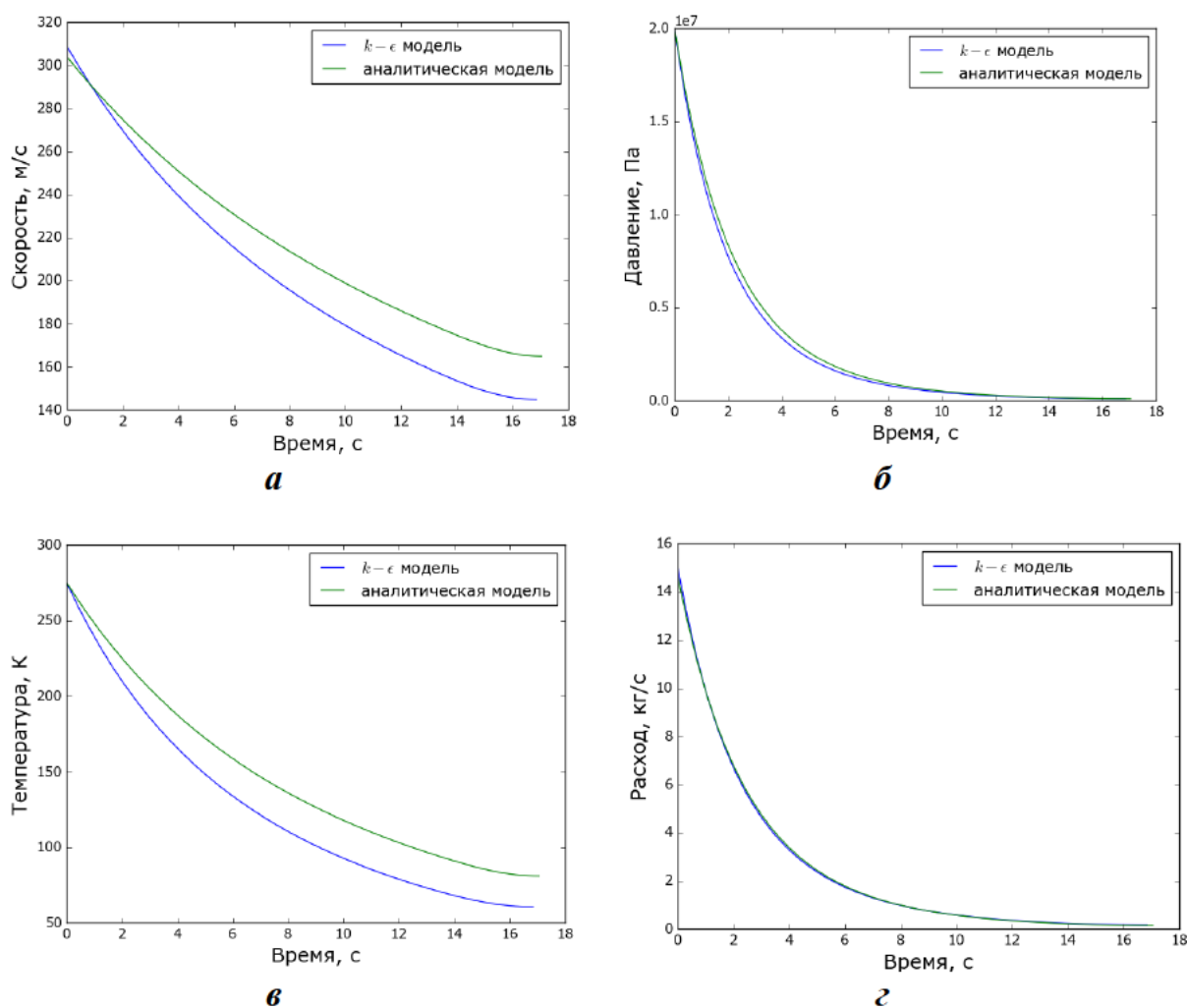
Приравняв уравнения (27) и (21), получим (с учетом (26)) дифференциальное уравнение опорожнения баллона ограниченной емкости  $V_0$

$$\frac{1}{n} \left( \frac{p_t}{p_0} \right)^{\frac{1}{2n}-\frac{3}{2}} d \left( \frac{p_t}{p_0} \right) = -\phi(p_a/p_t) \frac{f}{V_0} \sqrt{\frac{p_0}{\rho_0}} dt \quad (28)$$



Уравнение (28) интегрируется численно методом Рунге-Кутты 4-го порядка точности с учетом начального состояния газа ( $T_0$ ,  $p_0$ ,  $V_0$ ), уравнения состояния газа и уравнения политропы. В процессе интегрирования уравнения (28) от  $p_0$  до  $p_a$  также определяется полное время опорожнения баллона ограниченной емкости.

**4. Результаты численного моделирования и аналитической модели** представлены на рис. 8.



**Рис. 8. Зависимость основных параметров газа от времени:**  
**а** – скорость; **б** – давление; **в** – температура; **г** – расход

## 5. Заключение

В ходе данной работы было промоделировано истечение газа из конечного объема высокого давления при помощи численной модели турбулентности  $k-\epsilon$  и при помощи аналитической модели термодинамического истечения газа. Результаты моделирования, представленные на рис. 8, позволяют утверждать, что результаты аналитической модели практически полностью идентичны результатам численного моделирования, усреднен-

ным по всему объему баллона. Это дает возможность рассматривать процессы истечения газа без использования ресурсоемких численных моделей для инженерной оценки основных параметров газового потока.

В случае необходимости визуализации процессов истечения газа с целью определения скачков уплотнения, характеристик пограничного слоя, турбулентности возможно использование программного комплекса OpenFOAM со стандартным решателем sonicFoam и со стандартной моделью турбулентности  $k - \varepsilon$ .

**Благодарности.** Выражаем благодарность к.ф.-м.н. Илье Евдокимову за упрощенную процедуру облачного доступа к вычислительному кластеру ИСП РАН.

### **Список литературы**

1. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. М.: Оборонгиз, 1962. 705 с.
2. Башта Т.М. Гидропривод и гидропневматика. М.: Машиностроение, 1972. 320 с.
3. A.E. Makled, M.A. AL – Sanabawy and M.A. Bark. Theoretical and experimental evaluation of cold gas system components, 13<sup>th</sup> International Conference of Aerospace Sciences & Aviation Technology, ASAT – 13. P. 23.
4. Durbin P.A., Reif B.A.P. Statical theory and modeling for turbulent flows, John Wiley and Sons, West Sussex, United Kingdom, 2011, 357 p.
5. Sumer B.M. Lecture notes on turbulence. Technical University of Denmark, 2007. 191 p.
6. Christopher J. Greenshields. OpenFOAM User Guide, OpenFOAM Foundation Ltd, version 3.0.1, 2015. 230 p.

*Кабанов Сергей Михайлович, главный инженер-математик отдела разработки специального программного обеспечения, [smkabanov@inbox.ru](mailto:smkabanov@inbox.ru), Россия, Москва, АО «Системная динамика»,*

*Фридлиндер Григорий Владимирович, инженер-математик отдела разработки специального программного обеспечения, [fridlender.g.v@gmail.com](mailto:fridlender.g.v@gmail.com), Россия, Москва, АО «Системная динамика»*

### ***SIMULATION PROCESSES EXPIRATION COMPRESSED GAS FROM THE CONTAINER WITH FINAL VOLUME***

*S.M. Kabanov, G.V. Fridlender*

*The article considers the problem of gas outflow from the final volume high pressure cylinder. Carried out the numerical simulation of gas outflow process from the cylinder. Obtained an analytical dependences of gas parameters of the gas from the time. Obtained a comparative analysis results from numerical simulation and results from analytical model.*

*Key words: gasflow, turbulence,  $k - \varepsilon$  model, thermodynamics model, OpenFOAM.*

*Kabanov Sergej Mihajlovich, chief engineer-mathematician of department of development of the special software, [smkabanov@inbox.ru](mailto:smkabanov@inbox.ru), Russia, Moscow, JSC "Sistemnaya dinamika",*

*Fridlender Grigorij Vladimirovich, engineer-mathematician of department of development of the special software, [fridlender.g.v@gmail.com](mailto:fridlender.g.v@gmail.com), Russia, Moscow, JSC "Sistemnaya dinamika"*

УДК 004.93

## **ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ НЕЙРОСЕТЕВОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ АВТОРА ПОЧЕРКА**

**В.А. Ермоленко, А.В. Ермоленко**

*Рассмотрены вопросы поддержки принятия решений по обработке рукописных документов подразделениями вневедомственной охраны полиции. Автором разработан оригинальный метод выделения уникальных характеристик почерка на основе строкового и межбуквенного анализа. Применены методы кодирования символов с использованием теории графов. Модифицирован критерий информативности и показана разделимость признаковой базы. Синтезирована архитектура нейросетевого решающего устройства, модифицированная использованием теории нечётких множеств.*

*Ключевые слова: нейронная сеть, почерк, кластеризация, идентификация, поддержка принятия решений, нечёткие множества.*

Подразделения вневедомственной охраны МВД России предназначены для охраны имущества всех форм собственности на договорной основе. По состоянию на декабрь 2015 г. под охраной полиции находятся 1 565 287 объектов, квартир и иных мест хранения имущества граждан. Процесс охраны объектов основывается на заключении договора по личному заявлению собственника охраняемого объекта. Любые изменения в условиях действия договора на охрану имущества также базируются на письменных заявлениях собственников. Данные изменения зачастую являются существенными для обеспечения имущественной безопасности. Так в список лиц, имеющих право снятия объекта с охраны, могут вноситься дополнительные персоналии, а техническая блокировка охранно-пожарной сигнализации объекта претерпевать значительные изменения вплоть до отключения от охраны отдельных рубежей [1]. Кроме того, на основе заявлений производится блокировка, приостановка и снятие объектов с охраны. Принимая в учёт число охраняемых объектов, нагрузка по таким заявлениям на территориальные филиалы вневедомственной охраны является значительной. Принятие решений при ручной обработке