

МРНТИ 27.35.33: 27.35.47; 27.35.51; 87.17.03

## Моделирование динамики крупномасштабного облака при мощных взрывах ракетносителя в неоднородной атмосфере

Каржаубаев К.К., Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан, +77073569961, E-mail: kairzhan.k@gmail.com  
 Жакебаев Д.Б., Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан, +77017537477, E-mail: dauren.zhakebayev@gmail.com  
 Абдибекова А.У., Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан, +77029299933, E-mail: a.aigerim@gmail.com  
 Жубат К.Ж., РГП Научно-исследовательский центр «Ғарыш-Экология» г. Алматы, Республика Казахстан, +77015157915, E-mail: zhubat@mail.ru

В данной работе рассматривается динамика крупномасштабного облака, образующихся при мощных взрывах, в неоднородной атмосфере, с учетом турбулентного перемешивания и адиабатического расширения. Численное моделирование осуществляется на основе решения трехмерного отфильтрованного нестационарного уравнения Навье-Стокса, уравнения неразрывности, уравнения концентрации, уравнения энтальпии, уравнения состояния для сжимаемых сред. Модифицированный решатель основан на библиотеке решения задач математической физики OpenFOAM. Для замыкания основных уравнений используется вязкостная модель турбулентности. Определены изменение размера облака в атмосфере в зависимости от термодинамических параметров. Произведен расчет энергии взрыва рассчитанного от остатка топлива ракетносителя «Протон-М».

**Ключевые слова:** взрыв, Протон-М, облако, турбулентность, метод конечных объемов, моделирование, LES.

## Біркелкі емес атмосферада ракета тасығыштың күшті жарылысы нәтижесінде пайда болған ауқымды бұлт динамикасын модельдеу

Қаржаубаев Қ.Қ., әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, +77073569961, E-mail: kairzhan.k@gmail.com  
 Жакебаев Д.Б., әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, +77017537477, E-mail: dauren.zhakebayev@gmail.com  
 Абдибекова А.У., әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, +77029299933, E-mail: a.aigerim@gmail.com  
 Жұбат Қ.Ж., «Ғарыш-Экология» ғылыми-зерттеу орталығы» РМҚ, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, +77015157915, E-mail: zhubat@mail.ru

Бұл мақалада біркелкі емес атмосферадағы күшті жарылыс нәтижесінде пайда болған ауқымды бұлт динамикасын, турбулентті араластыру және адиабатикалық кеңеюді ескере отырып қарастырамыз. Саңдық модельдеу үшөлшемді фильтрлі стационарлық емес Навье-Стокс теңдеуін, үздіксіздік теңдеуін, концентрация теңдеуін, энтальпия теңдеуін, қысылатын орта үшін күй теңдеуін шешу негізінде жүзеге асырылады. Өзгертілген шешуші OpenFOAM математикалық физика кітапханасына негізделген. Негізгі теңдеулерді жабу үшін турбуленттіліктің тұтқыр моделі қолданылады. Атмосферадағы бұлт өлшемінің өзгеруі термодинамикалық параметрлерге байланысты анықталады. Протон-М зымыранының қалған бөлігіне есептелген жарылыс энергиясын есептеу жүргізіледі.

**Түйін сөздер:** жарылыс, Протон-М, бұлт, турбуленттілік, ақырлы көлем әдісі, модельдеу, LES

## Modelling of the large-scale cloud dynamics in powerful explosions of a screening consumer in the inhomogeneous atmosphere

Karzhaubayev K.K., al-Farabi Kazakh National University,  
 Almaty, Republic of Kazakhstan, +77073569961, E-mail: kairzhan.k@gmail.com  
 Zhakebayev D.B., al-Farabi Kazakh National University,  
 Almaty, Republic of Kazakhstan, +77017537477, E-mail: dauren.zhakebayev@gmail.com  
 Abdibekova A.U., al-Farabi Kazakh National University,  
 Almaty, Republic of Kazakhstan, +77029299933, E-mail: a.aigerim@gmail.com  
 Zhubat K.Zh., RSE Scientific and Research Center "Garish-Ecology  
 Almaty, Republic of Kazakhstan, +77015157915, E-mail: zhubat@mail.ru

In this paper, we consider the dynamics of a large-scale cloud formed in strong explosions in an inhomogeneous atmosphere, with allowance for turbulent mixing and adiabatic expansion. Numerical simulation is carried out on the basis of the solution of the three-dimensional filtered non-stationary Navier-Stokes equation, the continuity equation, the concentration equation, the enthalpy equation, and the equation of state for compressible media. The modified solver is based on the OpenFOAM mathematical physics library. To close the basic equations, a viscous model of turbulence is used. The change in the size of the cloud in the atmosphere is determined depending on the thermodynamic parameters. The calculation of the explosion energy calculated for the remainder of the Proton-M carrier rocket was made.

**Key words:** explosion, Proton-M, cloud, turbulence, finite volume method, modelling, LES

## 1 Введение

Все стадии цикла РКД, могут представлять экологическую опасность, что зачастую определяет очень большие, фактически, глобальные, масштабы проблемы. В первую очередь, это непосредственное загрязнение окружающей среды токсичными компонентами самого ракетного топлива, а также продуктами его горения. Так при запуске ракетносителя «Протон» только плановый выброс в атмосферу остатков неотработанного гептила из 1-й и 2-й ступеней составляет 2,7 тонны, а в случае аварии ракетносителя в атмосферу выбрасываются десятки тонн этого высокотоксичного горючего. В приземном слое атмосферы высотой до 1 километра, выбросы, образующиеся при стартах космических кораблей, могут приводить к токсичному загрязнению облаков, выпадению кислотных дождей и изменениям погодных условий в районе старта на территории до 200 квадратных километров. При этом сильные турбулентные потоки в атмосфере приводят к быстрому перемешиванию выброшенных химических компонентов с большими объемами воздуха и распространению их на большие расстояния, где роль облаков в эволюции атмосферных загрязнителей весьма значительна (Справочное пособие, 2000: 66-167), (Goodchild, 2008: 1-17). Динамика облаков сильно изменяет распределение загрязняющих веществ через адвекцию и более локальные вихревые движения. Микрофизика облаков участвует в эволюции загрязняющих веществ путем конденсации/ испарения и процессов сбора, переноса их в капли при образовании осадков и повторно впрыскивая обратно в воздух путем испарения капелек и капель дождя (Jakala, 2007: 1-10), (Жубатов, 2015: 1-152). С одной стороны, процессы в облаках приводят к очистке атмосферы путем мокрого удаления загрязнений. С другой стороны, они несут ответственность за так называемые кислотные дожди, наносящие ущерб материальным поверхностям водных и лесных экосистем. Кроме того, облака принимают активное участие в отслеживании химического перераспределения, влияют на глобальный бюджет излучения и, таким образом, влияют на глобальную фоновую атмосферу.

Существует модели, посвященных моделированию динамики крупномасштабных облаков, образующихся при мощных взрывах, в неоднородной атмосфере. В большинстве из них основное внимание уделялось динамическим аспектам развития облаков (Зейлер, 2001, 1-254). Однако все эти явления происходят во влажной атмосфере, и этот аспект в значительной степени влияет на основные параметры эволюции облаков и процессы очистки загрязняющих веществ. Имеются работы (Ishii, 2014: 1392-1408), (Michell, 2001: 1-190), (Ungerer, 2002: 41-54), (Fan, 2011:1-17), где внимание было уделено исследованию микрофизических характеристик. Но эти модели были основаны на приближении Буссинеска, которое неприменимо к потокам с большими вариациями термодинамических параметров и большими параметрами гидростатической сжимаемости, поэтому они не могли адекватно моделировать динамические характеристики таких облаков (Shaner, 2002: 1-226). В целом можно сказать, что в каждой модели строго учитываются лишь некоторые особенности взаимодействия облачных процессов, в то время как остальные рассматриваются приблизительно, с использованием сильных упрощающих предположений и грубых параметризации. Таким образом, существует острая необходимость в численном моделировании, способной правильно представлять все существенные взаимодействия, по крайней мере, между динамическими и микрофизическими процессами в конвективных облаках, развивающихся в экстремальных условиях.

В данной работе рассматривается динамика крупномасштабного облака, образующихся при мощных взрывах, в неоднородной атмосфере, с учетом турбулентного перемешивания и адиабатического расширения. Температура воздуха в начальный момент вихревого кольца очень велика, со временем она падает за счет адиабатического расширения и турбулентного перемешивания нагретого и холодного воздуха. Под действием силы инерции происходит процесс увеличения облака в атмосфере до момента выравнивания внутренней и внешней температуры и турбулентной энергии.

Численное моделирование динамики крупномасштабного облака осуществляется на основе решения трехмерного отфильтрованного нестационарного уравнения Навье-Стокса, уравнения неразрывности, уравнения концентрации, уравнения энтальпии, уравнения состояния для сжимаемых сред. Для замыкания основных уравнений используется вязкостная модель турбулентности. Основной проблемой в рассматриваемой задаче является корректное описание процессов турбулентного переноса. В настоящей работе сделана попытка решить эту проблему путем использования метода крупных вихрей.

Представлены результаты численного моделирования динамики крупномасштабного облака, образующихся при мощных взрывах ракетносителя «Протон-М» на высоте 42 км, где происходит очень скоротечный этап образования аэрозольного облака, включающий быстрые процессы истечения, расширения и конденсации гептила в стратосфере. На высотах более 40 км компоненты ракетного топлива не вступают в химические реакции. Получено изменение размера облака в атмосфере в зависимости от термодинамических параметров. Приведен расчет мощности взрыва рассчитанного от остатка топлива.

## 2 Материал и методы

### 2.1 Постановка задачи

Пусть в начальный момент времени на высоте  $H_0$  в атмосфере находится огненный полу шар, областью -  $G$ , радиусом -  $R$ , начальной температурой шара -  $T_0$ , и начальной объемной плотностью газовых фаз сухого воздуха -  $\rho_d$  и влажного воздуха -  $\rho_w$ , температура окружающей среды -  $T_1$  (рисунок 1).

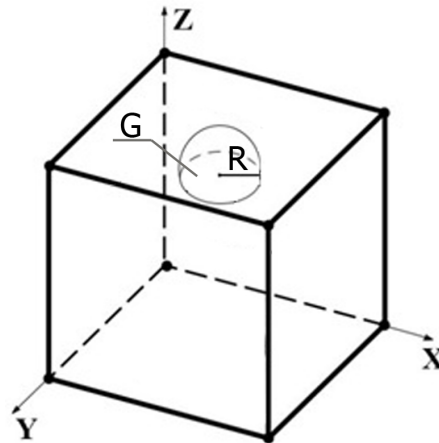


Рисунок 1 - Схематичная иллюстрация постановки задачи.

Для решения рассматриваемой задачи используются следующие уравнения:

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla(\rho_m u_m) = 0 \tag{1}$$

где скорость смеси газовой фазы  $u_m$ , плотность воздуха  $\rho_m = \rho_w + \rho_d$ ,  $u_m = \frac{\mu_m}{\rho_m}$  - динамическая вязкость,  $\mu_m = \mu_* \left(\frac{T}{T_*}\right)^w$ , где  $\mu_*$  - значение динамической вязкости при температуре  $T_*$ ,  $\rho_d = \sum_{\alpha=1}^{N_\alpha} S_\alpha \rho_\alpha$ ;  $\sum_{\alpha=1}^{N_\alpha} S_\alpha = 1$  - объемная плотность газовой фазы сухого воздуха,  $\rho_w = \sum_{\beta=1}^{N_\beta} S_\beta \rho_\beta$ ;  $\sum_{\beta=1}^{N_\beta} S_\beta = 1$  - объемная плотность газовой фазы водяного пара,  $\rho_\alpha = \rho_{*\alpha}(1 - \gamma(T - T_*))$ ,  $\alpha = 1, \dots, N_\alpha$ ;  $\rho_\beta = \rho_{*\beta}(1 - \gamma(T - T_*))$ ,  $\beta = 1, \dots, N_\beta$ , также  $\rho_{*\alpha}$ ,  $\rho_{*\beta}$  - плотность газовых компонентов сухого воздуха и влажного воздуха соответственно, при  $T_* = 20$ .

Уравнение концентрации:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_m S_\alpha)}{\partial t} + \nabla(\rho_m u_m S_\alpha) &= 0, \alpha = 1, \dots, N_\alpha \\ \frac{\partial(\rho_m S_\beta)}{\partial t} + \nabla(\rho_m u_m S_\beta) &= 0, \beta = 1, \dots, N_\beta \end{aligned} \tag{2}$$

Уравнение движения:

Закон сохранения количества движения может быть записан с достаточной точностью в виде:

$$\frac{\partial(\rho_m u_m)}{\partial t} + \nabla(\rho_m u_m \otimes u_m + \rho_m \mathbf{T}_r) = -\nabla p + \nabla \mathbf{T} + \rho_m g \quad (3)$$

где  $g$  - ускорение происходит под действием силы тяжести,  $\mathbf{T}$  - тензор напряжений газовой фазы,  $t$  - время,  $p$  - давление.

Уравнение энтальпии:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_m h_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m h_m u_m) + \nabla \cdot (q - \mathbf{T} \cdot u_g) = \\ = \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\partial(\rho_m K_m)}{\partial t} - \nabla \cdot (\rho_m K_m u_m) + \rho_m (g \cdot u_m) \end{aligned} \quad (4)$$

где энтальпия смеси газовой -  $h_m$ , тепловой поток в газовой фазе -  $q = -k_g \Delta T$ , здесь -  $k_g = \sum_{i=1}^{N_I} \chi_i k_i$ ,  $k_i$  - проводимость  $i$ -го компонента,  $T$  - температура,  $K_m = \frac{1}{2}[u_m]^2$  - кинетическая энергия на единицу массы газовой фазы.

Уравнение температуры:

$$T = \frac{h_m}{\frac{1}{\rho_m} \sum_{i=1}^I \rho_i C_i + \frac{1}{\rho_m} \sum_{i=1}^I \rho_i R_i} \quad (5)$$

где  $C_i$  - теплоемкость газовой фазы при постоянном объёме.

Уравнение давления:

Выполняется уравнение состояния идеального газа:

$$P = \frac{R_*}{M_{rd}} \rho_d T + \frac{R_*}{M_{rw}} \rho_w T = R_* T \left( \frac{\rho_d}{M_{rd}} + \frac{\rho_w}{M_{rw}} \right) \quad (6)$$

где  $R_* = 8.3144598$ ,  $M_{rd} = \sum_{\alpha}^{N_{\alpha}} S_{\alpha} M_{r\alpha}$ ,  $M_{rw} = \sum_{\beta}^{N_{\beta}} S_{\beta} M_{r\beta}$

Уравнение полной энергии состоит их удельной внутренние энергий и кинетической энергий:

$$E = U + E_k \quad (7)$$

где  $E = 0, 25 * q * t$  - энергия взрыва;  $t$  - время взрыва;  $q$  - мощность взрыва.

Одна треть всей выделившейся при взрыве энергии испускается в виде излучения (Garnier, 2009:1-276). В итоге энергия, заключенная в огненном шаре к началу его подъема, составляет примерно одну четверть от всей энергии взрыва. Удельная внутренняя энергия при адиабатическом процессе выражается:

$$U = C_v (T_1 - T_0) \quad (8)$$

здесь  $C_v$  - теплоемкость газа в процессах с постоянным объемом,  $T_1$  - температура окружающей среды, при различных значениях начальной температуры  $T_0 = 3000^\circ C$  огненного шара:

$$E_k = \frac{2}{3}u_0^2 \tag{9}$$

Подставляя уравнения ( 8) и ( 9) в уравнение ( 7), получим начальное значение температуры огненного шара:

$$u_0^2 = \frac{2}{3}(E - U), u_1 = u_2 = u_3 = u_0 \tag{10}$$

Начальные условия:

$$\begin{aligned} u_i(x_1, x_2, x_3, t = 0) &= u_0(x_1, x_2, x_3), (x_1, x_2, x_3) \in G, \\ u_i(x_1, x_2, x_3, t = 0) &= 0, (x_1, x_2, x_3) \notin G, \\ T(x_1, x_2, x_3, t = 0) &= T_1, (x_1, x_2, x_3) \in G, \\ T(x_1, x_2, x_3, t = 0) &= T_0, (x_1, x_2, x_3) \notin G, \\ S_\alpha(x_1, x_2, x_3, t = 0) &= \frac{\rho_\alpha}{\rho_m}, \alpha = 1, \dots, N_\alpha, \\ S_\beta(x_1, x_2, x_3, t = 0) &= \frac{\rho_\beta}{\rho_m}, \beta = 1, \dots, N_\beta, \end{aligned}$$

Граничные условия:

$$\frac{\partial u_i}{\partial n} = 0, \frac{\partial S_\alpha}{\partial n} = 0, \frac{\partial S_\beta}{\partial n} = 0, \frac{\partial T}{\partial n} = 0, i = 1, 2, 3, \alpha = 1, \dots, N_\alpha, \beta = 1, \dots, N_\beta.$$

## 2.2 Алгоритм определения полной энергий при взрыве РН

Для данной задачи важна энергия взрыва РН, определяемая тротильным эквивалентом  $T \ni_\tau$  находящегося на РН к моменту взрыва  $\tau$  запаса компонентов ракетного топлива (КРТ) (Бирюков, 2003: 1-288):

$$T \ni_\tau = T \ni_0 \left(1 - \frac{m_\Sigma \tau}{M_0}\right), \tag{11}$$

где  $T \ni_0$  – тротильный эквивалент полностью заправленной РН в кг тринитротолуола (ТНТ);  $m_\Sigma$ – суммарный расход КРТ в полете, кг/с;  $M_0$ – масса КРТ в полностью заправленной РН, кг.

Масса КРТ, участвующая во взрыве выглядит следующим образом:

$$M_b = (M_0 - m_{\ni\tau}) \frac{T \ni_\tau}{T \ni_0}, k = 0, 1 \tag{12}$$

где  $k$ – отношение энергий, выделяющихся при взрыве 1 кг ТНТ и сгорании 1 кг топлива. Для топливных пар «НДМГ – АТ» и «керосин – кислород»  $k = 0.1$  . Полная энергия, выделяющаяся при взрыве РН, определяется соотношением ( 13):

$$E = M_b * E_{КТ}, \tag{13}$$

где  $E_{KT}$  – удельная теплота сгорания 1 кг топлива, Дж/кг, при этом 90% выделяющейся при взрыве энергии расходуется на формирование ударной волны и 10% – на сообщение скорости продуктам взрыва (Онфуриев, 1967: 3-15).

### 2.3 Метод крупных вихрей

Применяя фильтр к основным уравнениям (1) – (6), получены следующие уравнения (14 – 17):

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \overline{\rho_m}}{\partial t} + \nabla \cdot (\overline{\rho_m} \cdot \overline{u_m}) = 0 \quad (14)$$

Уравнение концентрации:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_m S_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m h_m S_\alpha) &= -\nabla \cdot G_\alpha, \alpha = 1, \dots, N_\alpha \\ \frac{\partial(\rho_m S_\beta)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m h_m S_\beta) &= -\nabla \cdot G_\beta, \beta = 1, \dots, N_\beta \end{aligned} \quad (15)$$

где  $G_\alpha = \overline{\rho_m(S_\alpha u_m)} - \overline{S_\alpha} \overline{u_m} = -\frac{\mu_t}{Pr_t} \Delta \overline{S_\alpha}$ ,  $G_\beta = \mathbf{B}(\overline{S_\beta u_m} - \overline{S_\beta} \overline{u_m}) = -\frac{\mu_t}{Pr_t} \Delta \overline{S_\beta}$  описывают вклад подсеточных турбулентных масштабов для уравнений концентрации компонент газа.

Уравнение движение:

Закон сохранения количества движения может быть записан с достаточной точностью в виде:

$$\frac{\partial(\rho_m u_m)}{\partial t} + \nabla(\rho_m u_m \otimes u_m + \rho_m \mathbf{T}_r) = -\nabla p + \nabla \mathbf{T} + \rho_m g - \nabla \mathbf{B} \quad (16)$$

где  $\mathbf{B} = \overline{\rho_m(u_m \otimes u_m - \overline{u_m} \otimes \overline{u_m})} = \frac{2}{d} K_t \mathbf{I} - 2\mu_t \mathbf{S}_m$  - подсеточный тензор, отвечающий за мелкомасштабные структуры, которые нужно моделировать.

Уравнение энтальпии:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_m h_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m h_m u_m) + \nabla \cdot (q - \mathbf{T} \cdot u_g) &= \\ = \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\partial(\rho_m K_m)}{\partial t} - \nabla \cdot (\rho_m K_m u_m) + \rho_m (g \cdot u_m) - \nabla \cdot (Q + Q_K) \end{aligned} \quad (17)$$

где  $Q = \overline{\rho_m(h_m u_m - \overline{h_m} \cdot \overline{u_m})} = -\frac{\mu_t}{Pr_t} \Delta \overline{h_m}$ ,  $Q_K = \overline{\rho_m(K_m u_m - \overline{K_m} \cdot \overline{u_m})} = -\frac{\mu_t}{Pr_t} \Delta \overline{K_m}$  - описывают вклад подсеточных турбулентных масштабов (Онфуриев, 1967: 3-15), (Piscaglia, 2013: 926-940),  $Pr_t$  - турбулентное число Прандтля,  $\mu_t$  - турбулентная вязкость.

### 2.4 Численный метод

Для получения нестационарных полей неизвестных переменных проводится трехмерное численное моделирование уравнения (14 - 17) с указанными начальными и граничными условиями.

Реализация численного алгоритма проведена на основе метода конечных объемов на неструктурированной сетке с использованием библиотеки классов OpenFOAM для языка C++ имеющей открытую лицензию GPL. Благодаря высокому уровню абстракции с применением шаблонов языка C++ библиотека OpenFOAM позволяет быстро создавать эффективные решатели и утилиты для пре и пост обработки результатов моделирования. Классы и функции в библиотеке OpenFOAM имеют неявные средства для распараллеливания вычислительных процедур, благодаря которым проведение численного расчета на многопроцессорных вычислительных системах не требует специфичных адаптаций в программном коде.

В методе конечных объемов (Ferziger, 2002: 251-268) дифференциальные уравнения в частных производных интегрируются по объему произвольной ячейки, после чего применяется теорема Гаусса-Остроградского для перевода объемных интегралов в поверхностные.

При вычислении потоков через границы конечного объема необходимо интерполировать неизвестные значения на каждую грань конечного объема. От выбора метода интерполирования зависят такие характеристики как точность и устойчивость. Интегрирование по времени проводится с помощью схемы Кранка-Николсона, число Куранта поддерживалось на уровне 0.5.

Для обеспечения устойчивости численного расчета применялись неявные схемы, как для конвективных, так и для диффузионных слагаемых.

Для связывания полей скорости и давления, а так же для выполнения закона сохранения массы использовалась процедура PISO. В уравнениях движения и сохранения массы используются явные представления полей давления и силы тяжести. Пространственная дискретизация имеет второй порядок точности.

Алгоритм PISO состоит из одного шага предиктора и нескольких шагов корректоров. В шаге предиктор находится промежуточное поле скорости с использованием поля давления из предыдущего временного слоя. На каждом шаге корректоре производится коррекция поля скорости и давления для увеличения точности и уменьшения дефекта массы в уравнении сохранения.

Система линейных алгебраических уравнений, полученная в результате дискретизации уравнения переноса, решается методом сопряженных градиентов с предобуславлителем Халецкого для уравнения давления и методом бисопряженных градиентов с предобуславлителем неполной LU факторизации.

Алгоритм численного решения разработан следующим образом:

1. Решение уравнения сохранения для плотности смеси явным методом, используя потоки с предыдущего временного слоя.
2. Решение уравнения переноса для газовых составляющих.
3. Решение уравнения сохранения импульса, используя поле давления с предыдущей итерации.
4. Решение уравнения переноса энтальпии, используя поле давления с предыдущей итерации.
5. Решение уравнения Пуассона для давления.
6. Модификация полей плотности и скорости на основе нового поля давления.
7. Возобновление итерации с шага 5 для уменьшения дефекта масс в уравнении сохранения массы.



8. Вычисление подсеточной вязкости.
9. Оценка точности решения и переход на шаг 2 в случае необходимости.

### 3 Результаты и обсуждение

Произведено моделирование при реалистичном сценарии аварийного взрыва ракетопылителя с определением состава и температурного распределения внутри аэрозольного облака.

Рассматривается моделирование динамики крупномасштабного облака, образующихся при мощных взрывах ракетопылителя «Протон-М» на высоте 42 км. На высотах более 40 км компоненты ракетного топлива не вступают в химические реакции. Здесь рассматривается этап образования аэрозольного облака, включающий быстрые процессы истечения, расширения и конденсации гептила в стратосфере.

Для расчёта параметров состояния воздуха на различных высотах пользуются стандартной атмосферой (СА) – условным распределением, не зависящим от погодных условий, времени года и времени суток. На территории СНГ принято пользоваться стандартной атмосферой - ГОСТ 4401-81 (Таблица 1).

**Таблица 1** – Входные данные

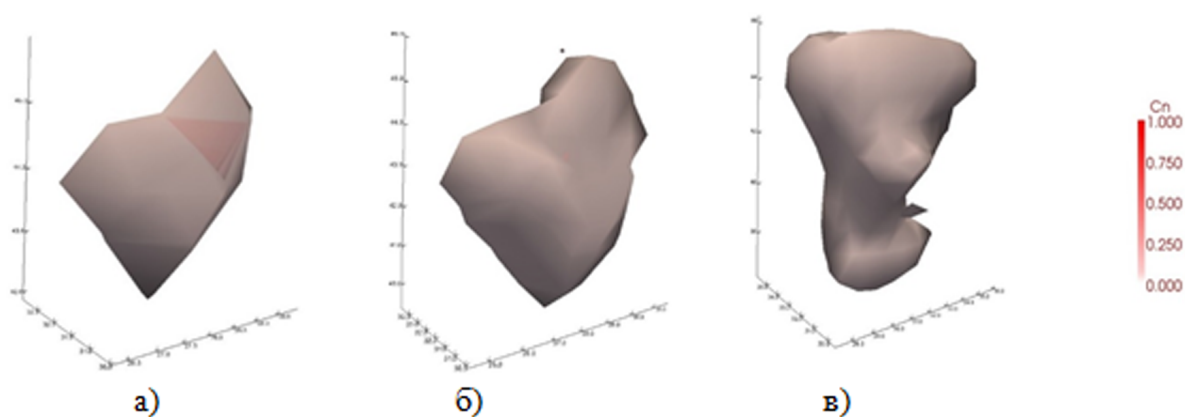
Высота, км	Средне годовая температура, С	Давление, Па	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Ускорение свободного падения, м/с <sup>2</sup>
36	-24,5	$4,98 \cdot 10^2$	$7,25 \cdot 10^{-3}$	9,69
38	-19,4	$3,77 \cdot 10^2$	$5,38 \cdot 10^{-3}$	9,69
40	-16,2	$2,87 \cdot 10^2$	$3,99 \cdot 10^{-3}$	9,68
42	-9,83	$2,19 \cdot 10^2$	$2,99 \cdot 10^{-3}$	9,67
44	-5,92	$1,69 \cdot 10^2$	$2,25 \cdot 10^{-3}$	9,67
46	6,83	$1,31 \cdot 10^2$	$1,71 \cdot 10^{-3}$	9,66
48	3,67	$1,02 \cdot 10^2$	$1,31 \cdot 10^{-3}$	9,65
50	-1,83	$7,97 \cdot 10^1$	$1,02 \cdot 10^{-3}$	9,65

В данной работе описываются результаты численного моделирования облака сформировавшегося при мощных взрывах ракетопылителя «Протон-М». Для детального исследования загрязнения стратосферы рассматривается инерционное распространение продукта сгорания в направлении движения ракетопылителя и образованием облака. Решение задач осуществляется при заданных начальных и граничных условиях. Из количества остаточного топлива был определена энергия взрыва, образующегося при мощных взрывах ракетопылителя «Протон-М».

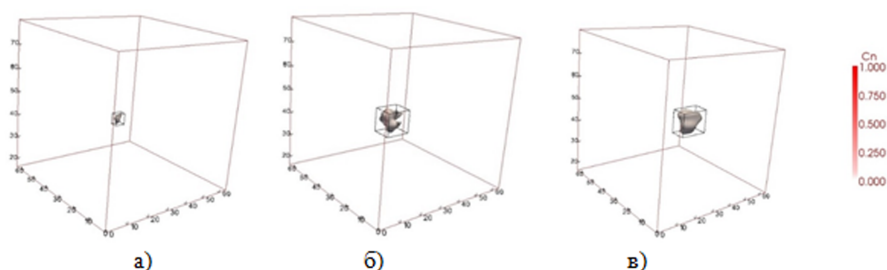
Расчеты проводились в прямоугольной области с размерами по обоим горизонтальным направлениям 6.5 км, а по высоте от 16 до 18 км. Расчетная сетка 128x128x128. В таблице 2 приведены расчетное время, размеры облака, высота нахождения облака и максимальная концентрация продукта сгорания.

**Таблица 2** – Информация о распространении гептила

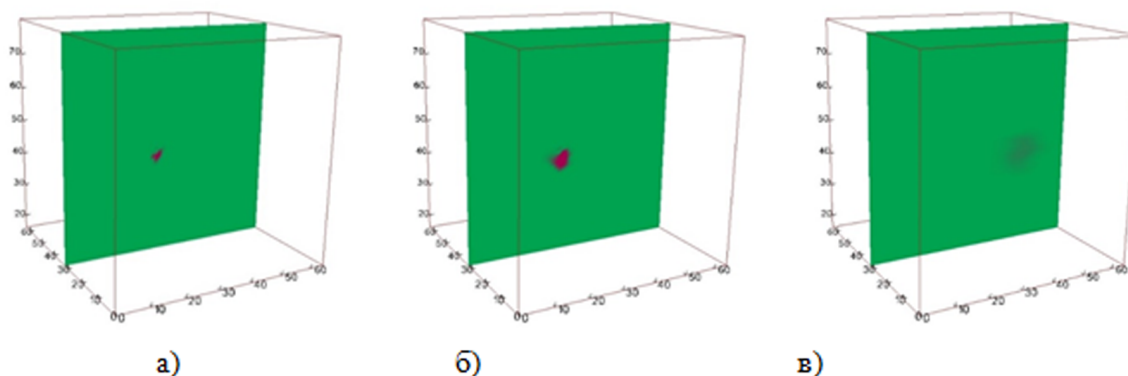
Время прошедшее после образования облака	Размеры облака, км	Высота нахождения облака, км	Максимальная концентрация, мг/м <sup>3</sup>
1 мин	1x1x1	40-41	1,2
5 мин	2x3x3	40-42	0,07
10 мин	3x5x5	39-42	0,016
20 мин	6x7x7	39-45	0,0041
30 мин	6x8x8	38-46	0,0032
40 мин	6x8x9	38-46	0,003
50 мин	6x8x10	38-46	0,0025
60 мин	6x8x10	38-46	0,0025



**Рисунок 2** - Изменение размера облака концентрации КРТ а) в начальный момент времени б) через 20 мин в) через 50 мин после мощного взрыва ракетносителя «Протон- М» на высоте 42 км при скорости ветра 50 м/с.



**Рисунок 3** - Изменение размера облака концентрации КРТ а) в начальный момент времени б) через 20 мин в) через 50 мин после мощного взрыва ракетносителя «Протон- М» на высоте 42 км при скорости ветра 50 м/с.



**Рисунок 4** - Распределение температуры облака КРТ а) в начальный момент времени б) через 20 мин в) через 50 мин после мощного взрыва ракетносителя «Протон- М» на высоте 42 км при скорости ветра 50 м/с, Токр = -100 С.

На рисунках 2 - 4 представлена динамика изменения объема облака и - распределение температуры продукта сгорания на высоте 42 км, при скорости ветра равной 50 м/с, в различные моменты времени.

На рисунках 2, 3 показаны изменения размера облака концентрации КРТ в зависимости от времени. Как видно из рисунков концентрация КРТ в начальный момент времени максимальна, равна  $1,2 \text{ мг/м}^3$  и является стержнем начального распространения. Под действием сил инерции облако расширяется и движется в направлении ветра, достигая границы расчетной области через 1 час взрыва ракетносителя «Протон-М», причем концентрация продукта сгорания уменьшается до  $0,0025 \text{ мг/м}^3$  равномерно распределяясь по объему облака. Движение и распределение облака находится на высотах от 38 до 46 км, это значит, что его динамика происходит в стратосфере, и не выходит в другие слои атмосферы.

На рисунке 4 изображено распределение температуры облака продукта сгорания в различные моменты времени. Как видно из рисунков в начальный момент времени температура облака КРТ максимальна, через час она становится равной температуре окружающей среды.

#### 4 Заключение

В данной работе было рассмотрено численное моделирование динамики крупномасштабного облака, образующихся при мощных взрывах ракетносителя «Протон-М». Начальные метеорологические условия, а также параметры взрыва, соответствуют реальным параметрам аварии РН «Протон-М».

Численный алгоритм основан на решении турбулентных отфильтрованных уравнений Навье-Стокса в сжимаемой постановке, уравнении сохранения массы, энтальпии и уравнении состояния для идеального газа. Для замыкания основных уравнений использована вязкостная модель турбулентности. Используемый численный алгоритм имеет второй порядок точности по времени и по пространству.

Получены результаты численного моделирования формирования и переноса крупномасштабного облака сформировавшегося в результате разлива компонентов ракетного топлива в атмосферу при мощных взрывах ракетносителя «Протон-М». Определены изменение размера облака в атмосфере в зависимости от термодинамических параметров. Произведен расчет энергии взрыва рассчитанного от остатка топлива ракетносителя «Протон-М».

Результаты данного исследования позволяют оценить объем и термодинамические параметры крупномасштабного облака в зависимости от высоты и давления окружающей среды. Подобная возможность неоценима при отсутствии экспериментальных данных об образовавшемся облаке в результате аварии. Полученные результаты позволят провести первичную оценку влияния аварии на окружающую среду.

Таким образом, осуществлена постановка задачи формирования облака в трехмерной области с учетом термодинамических параметров, разработана трехмерная математическая модель динамики крупномасштабного облака.

### Список литературы

- [1] Fan Y., Fahong L., Jianping SHI. Applications of GIS in Environment Monitoring [electronic resource]. - Technical Division of Surveying and Mapping, Xian, Shaanxi, China, 2011. URL: <http://www.seiofbluemountain.com/upload/product/201105/2011fzjz31.pdf> (date of the application: 16.07.2017)
- [2] Ferziger and Peric, Computational Methods for Fluid Dynamics. - 3., rev. ed. – Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Tokyo: Springer, 2002. ISBN 3-540-42074-6,-P.251-253.
- [3] Garnier, E., Adams, N., and Sagaut, P.: Large Eddy Simulation for Compressible Flows, doi:10.1007/978-90-481-2819-8, Springer, the Netherlands, 2009. -P.276.
- [4] Goodchild M. F. GIS and Modeling Overview [electronic resource]. - Ch. 1. National center for geographic information and analysis university of California Santa Barbara, California. 2008. URL: <http://geog.ucsb.edu/good/papers/414.pdf> (date of the application: 28.08.2017)
- [5] Ishii M. and Yamamoto K. "An Environmental Risk Evaluation Method Employing Atmospheric Dispersion Models and GIS," Journal of Environmental Protection, Vol. 4 No. 12, 2013, P. 1392-1408. doi: 10.4236/jep.2013.412160.
- [6] Jakala D. A GIS Enabled Air Dispersion Modeling Tool for Emergency Management [electronic resource]. - Department of Resource Analysis, Saint Mary's University of Minnesota, Minneapolis, 2007. URL: <http://www.gis.smumn.edu/GradProjects/JakalaS.pdf> (date of the application: 06.08.2017)
- [7] Piscaglia, F., Montorfano, A., and Onorati, A.: Towards the LES simulation of IC engines with parallel topologically changing meshes, SAE Int. J. Engines, 6, 926–940, doi:10.4271/2013-01-1096, 2013.
- [8] Shaner J., Wrightsell J. Editing in ArcMap // M: MSU, 2002. – P. 226.
- [9] Ungerer, M. J., Goodchild M. F. 2002. Integrating spatial data analysis and GIS: A new implementation using the Component Object Model (COM) / International Journal of Geographical Information Science. 2002. – Vol. 16. - P 41–54.
- [10] Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую природную среду: справочное пособие / под ред. В.В. Адушкина, С.И. Козлова, А.В. Петрова. – М.: Анкил, 2000. – 640 с.
- [11] Бирюков Г.П. Элементы теории проектирования ракетно космических комплексов / Г. П. Бирюков, В. И. Смирнов. – М. Изд-во МАИ, 2003. – 288 с.
- [12] Разработка программного комплекса моделирования динамики облака, образовавшегося при наземном взрыве ракеты-носителя: отчет о НИР / РГП «НИЦ «Гарыш-Экология»: рук. Жубатов Ж. – Алматы, 2015. – 152 с. - № ГР 0115РК01057. - Инв. № 0215РК01616.

- [13] Зейлер М. Моделирование нашего мира. Руководство ESRI по проектированию базы геоданных. – пер с англ. Дата+. – М: МГУ им. М. В. Ломоносова, географический факультет, 2001. – 254 с.
- [14] Митчел Э. Руководство ESRI по ГИС анализу. Географические закономерности и взаимодействия // М: МГУ им. М. В. Ломоносова, географический факультет, 2001. - Т.1. - пер с англ. – 190 с.
- [15] Онуфриев, А.Т. Теория движения вихревого кольца под действием силы тяжести. Подъем облака атомного взрыва // ПМТФ. 1967. № 2. -С. 3-15.

## References

- [1] Environmental problems and risks of impacts of rocket and space technology on the environment: a reference book / Ed. V.V. Adushkina, S.I. Kozlova, A.V. Petrova. - Moscow: Ankil, 2000. – P. 640.
- [2] Biryukov GP Elements of the theory of the design of space-rocket complexes / GP Biryukov, VI Smirnov. - M. Izd-vo MAI, 2003. P - 288.
- [3] Fan Y., Fahong L., Jianping SHI . Applications of GIS in Environment Monitoring [electronic resource]. - Technical Division of Surveying and Mapping, Xian, Shaanxi, China,2011. URL: <http://www.seiofbluemountain.com/upload/product/201105/2011fzjz31.pdf> (date of the application: 16.07.2017)
- [4] Ferziger and Peric, Computational Methods for Fluid Dynamics. - 3., rev. ed. – Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Tokyo: Springer, 2002. ISBN 3-540-42074-6,-P.251-253.
- [5] Garnier, E., Adams, N., and Sagaut, P.: Large Eddy Simulation for Compressible Flows, doi:10.1007/978-90-481-2819-8, Springer, the Netherlands,2009. -P.276.
- [6] Goodchild M. F. GIS and Modeling Overview [electronic resource]. - Ch. 1. National center for geographic information and analysis university of California Santa Barbara, California. 2008. URL: <http://geog.ucsb.edu/good/papers/414.pdf> (date of the application: 28.08.2017)
- [7] Ishii M. and Yamamoto K. "An Environmental Risk Evaluation Method Employing Atmospheric Dispersion Models and GIS,"Journal of Environmental Protection, Vol. 4 No. 12, 2013, P. 1392-1408. doi: 10.4236/jep.2013.412160.
- [8] Jakala D. A GIS Enabled Air Dispersion Modeling Tool for Emergency Management [electronic resource]. - Department of Resource Analysis, Saint Mary's University of Minnesota, Minneapolis, 2007.URL: <http://www.gis.smumn.edu/GradProjects/JakalaS.pdf> (date of the application: 06.08.2017)
- [9] Mitchell E. ESRI GIS Analysis Guide. Geographical regularities and interactions // M: Moscow State University. MV Lomonosov, Faculty of Geography, 2001. - Volume 1. - Per from the English. – P.190.
- [10] Onufriyev, A.T. Teoriya dvizheniya vikhrevogo koltsa pod peystviyem sily tyazhesti. Podyem oblaka atomnogo vzryva // PMTF. 1967. №2. -P.3-15.
- [11] Piscaglia, F., Montorfano, A., and Onorati, A.: Towards the LES simulation of IC engines with parallel topologically changing meshes, SAE Int. J. Engines, 6, 926–940, doi:10.4271/2013-01-1096, 2013.
- [12] Shaner J., Wrightsell J. Editing in ArcMap // M: MSU, 2002. – P. 226.
- [13] Ungerer, M. J., M. F. Goodchild. 2002. Integrating spatial data analysis and GIS: A new implementation using the Component Object Model (COM) / International Journal of Geographical Information Science. 2002. – Vol. 16. - P 41–54.
- [14] Zeiler M. Modeling of our world. ESRI's Guide to Geodatabase Design // M: Moscow State University. MV Lomonosov, Faculty of Geography, 2001. – P.254.
- [15] Development of a software package for simulating the dynamics of a cloud formed during a ground-based explosion of a carrier rocket: a report on the research project / RSE "SRC" Garish-Ecology ": hands. Zhubatov Zh. - Almaty, 2015. – P.152. - No.GR 0115PK01057. - Inv. No. 0215RK01616.