

DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-4-3

**ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ МНОГОМАСШТАБНЫХ ЗАДАЧ ГОРЕНИЯ****Н. Н. Смирнов, В. В. Тюренкова, В. Ф. Никитин***Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация**Федеральный научный центр «Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Москва, Российская Федерация*

*Аннотация:* разработка алгоритмической компоновки и программ для расчета многомасштабных процессов горения является актуальной междисциплинарной темой фундаментальных исследований, которая объединяет методы информационных технологий, механики многокомпонентных сплошных сред, химии и математического моделирования. Задача разработки алгоритмической компоновки и подбора программ для расчета многомасштабных процессов горения набирает актуальность с каждым годом в связи как с интенсивным развитием вычислительных методов и моделей, так и с увеличением современных возможностей суперкомпьютерных вычислений.

Практическая применимость разрабатываемых вычислительных моделей и методов охватывает проблемы энергетики, двигателестроения, взрывопожаробезопасности, а также интенсификации добычи полезных ископаемых с применением методов термохимического воздействия на пласт.

Основными проблемами, возникающими в процессе моделирования, являются: а) многомасштабность, не позволяющая проводить моделирование всех задействованных процессов на единых даже масштабируемых сетках; б) жесткость и большая размерность системы дифференциальных уравнений для описания химической кинетики, решение которой может занимать 80% процессорного времени. Данная статья представляет обзор уже проведенных исследований в ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН и анализ трудностей, с которыми столкнулись исследователи. В статье содержатся новые предложения по преодолению вычислительных трудностей и намечены пути их реализации.

Возможность решения проблем в части многомасштабности видится в применении подходов многоуровневого моделирования, при котором детальное решение задачи более мелкого масштаба обрабатывается и вносится в качестве элемента модели более крупного масштаба. Для решения проблемы сокращения времени интегрирования уравнений многостадийной химической кинетики актуальным трендом является применение нейросетевых подходов и методов в рамках разрабатываемых вычислительных моделей. Этот подход в настоящее время развивается сотрудниками отдела вычислительных систем совместно с коллективом Центра оптико-нейронных технологий ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН.

*Ключевые слова:* вычислительное моделирование, горение, многофазные среды, нейросети.

*Благодарности:* работы, выполненные в МГУ, были поддержаны РФФИ (грант 20-03-00297).

*Для цитирования:* Смирнов Н. Н., Тюренкова В. В., Никитин В. Ф. Цифровые модели для решения многомасштабных задач горения. *Успехи кибернетики*. 2021;2(4):30–41. DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-4-3.

**SIMULATION MODELS FOR SOLVING MULTISCALE COMBUSTION PROBLEMS****N. N. Smirnov, V. V. Tyurenkova, V. F. Nikitin***Moscow State University, Moscow, Russian Federation**Federal State Institution "Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences", Moscow, Russian Federation*

*Abstract:* the development of algorithms and software for analyzing multiscale combustion processes is a relevant field of fundamental research that combines the methods of information technologies, mechanics of multicomponent continua, combustion chemistry, and simulation. It gains relevance year to year due to the intensive development of computational methods and models, and with the increase in supercomputing performance.

The applications of the proposed computational models and methods include energy, engine manufacturing, explosion and fire safety fields, as well as thermochemical mineral recovery stimulation methods.

The key simulation problems are a. the problem is multiscale: all the processes involved cannot be simulated with the same grid, even a scalable one; b. the rigidity and large dimensionality of the system of differential equations that describes chemical kinetics. Its solution may take up to 80 % of the processor time. This paper is an overview of the research conducted at the Scientific Research Institute for System Analysis and an analysis of the difficulties faced by the researchers. It also proposes new ways for overcoming the computational difficulties and give some implementation considerations.

To solve the multi-scale issue, multi-level modeling approaches can be used: a detailed solution to a smaller-scale problem is processed and introduced as a component of a larger-scale model. To reduce the integration time of the multi-stage chemical kinetics equations, the current approach is applying neural networks and methods to the existing computational models. This approach is currently being developed at the Department of Computing Systems in collaboration with the Center for Optical-Neural Technologies, SRISA.

*Keywords:* computer simulation, combustion, multiphase media, neural networks.

*Acknowledgements:* this study is supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 20-03-00297).

*Cite this article:* Smirnov N. N., Tyurenkova V. V., Nikitin V. F. Simulation Models for Solving Multiscale Combustion Problems. *Russian Journal of Cybernetics*. 2021;2(4):30–41. DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-4-3.

## Введение

Развитие инфраструктуры информационного общества в государстве – это, без сомнения, важнейшая задача, решение которой приведет к повышению эффективности работы как органов управления различных уровней, так и всех отраслей промышленности, и, в целом, к повышению качества и безопасности жизни граждан.

Информационные технологии – это не только системы телекоммуникаций, хранения, обработки информации и принятия решений. Стратегические информационные технологии определяются созданием в государстве взаимоувязанной триады: инфраструктуры суперкомпьютеров и сетей, программных систем моделирования сложных технологических, природных, физиологических, экономических и социальных процессов, а также технологии использования этих двух компонент в повседневной деятельности ученых, конструкторов, технологов, врачей, экономистов, управленцев, нацеленной на достижение стратегических национальных приоритетов.

Задачи, нуждающиеся в проведении предсказательного вычислительного моделирования горения и взрыва в природных и технических системах, включают:

а) моделирование процессов в энергоустановках и в двигателях различных типов;

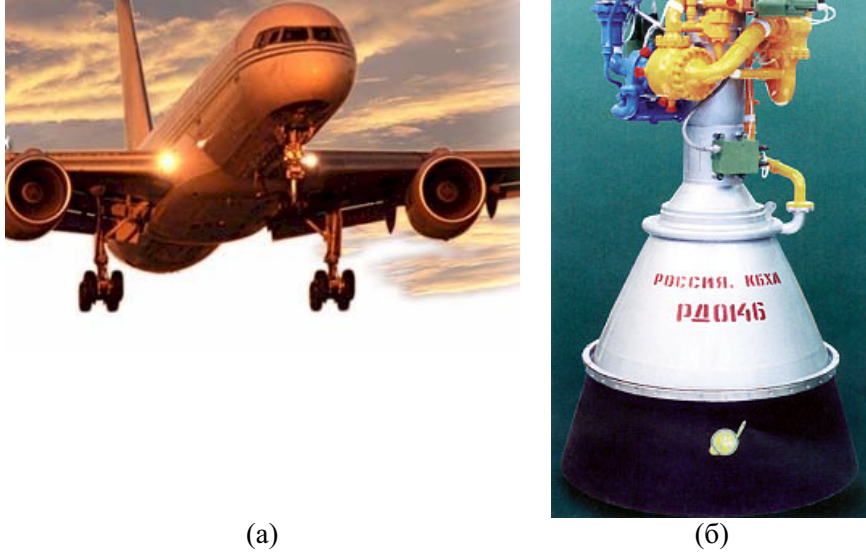
б) моделирование эффективности мер взрывопожаробезопасности при возникновении природных или техногенных катастроф.

В камерах сгорания большинства двигателей используются диспергированные горючие компоненты (рис. 1).

Близко примыкают к отмеченным задачам и вопросы безопасности транспортировки и хранения жидких горючих веществ, оценки последствий разрушения хранилищ жидких горючих материалов и сжиженных газов, формирования газокapельных облаков с последующим воспламенением и горением, так называемые Boiling Liquid Expanding Vapour Explosions (BLEVEs) [1].

При решении задач горения и перехода горения в детонацию в многофазных системах необходимо учитывать следующие ключевые аспекты проблемы: процессы образования горючей смеси (неравновесные фазовые переходы, диффузия, турбулентность), процессы воспламенения и распространения волны горения (за счет механизмов молекулярного или турбулентного переноса или за счет механизма сжатия в ударных волнах, поддерживаемых энерговыделением за фронтом), переходные процессы (переход горения в детонацию либо расщепление детонационной волны на ударную волну и отстающий от нее фронт горения).

При возникновении техногенных или природных катастроф процессы перехода горения в детонацию являются нежелательными и крайне опасными, при возникновении детонационной волны принимаются меры по ее разрушению (добавление ингибиторов, применение механических детонационных арресторов). При использовании детонации в камерах сгорания детонационных двигателей, устройств напыления и др. важным вопросом является промотирование возникновения устойчивой



**Рис. 1.** Примеры камер сгорания, использующих диспергированное горючее в атмосфере газообразного окислителя (а) и диспергированный окислитель в атмосфере газообразного горючего (б)

детонации, сокращение длины участка перехода горения в детонацию и уменьшение времени иницирования детонации.

В данной работе будут освещены особенности основных этапов вычислительного моделирования переходных процессов в химически реагирующих многофазных средах.

#### Задачи испарения и горения одиночных капель

Будем предполагать, что процесс горения капли протекает в квазистационарном режиме, т.е. размеры капли с течением времени уменьшаются значительно медленнее, чем устанавливается газодинамическая картина течения в окрестности капли. Данное предположение подтверждается тем, что скорость уменьшения диаметра капли в  $\frac{\rho_g}{\rho_l} \sim 10^{-3}$  раз меньше скорости оттока газов от поверхности. В рамках этого предположения скорость выгорания определяется в каждый момент времени из стационарного решения.

При наличии массовых сил (сил тяжести) могут возникнуть термогравитационные конвективные течения в окрестности капли (радиуса  $x_w$ ), являющиеся существенным эффектом при  $Mar = t_{evap}/t_{conv} = \frac{\sqrt{gx_w^3 h_L}}{D \hat{c}_{pe}(T_e - T_w + Y_{1e} \Phi_N \Delta H)} > 1$ . Тогда для капель с радиусом  $x_w^{3/2} < \frac{D \hat{c}_{pe}(T_e - T_w + Y_{1e} \Phi_N \Delta H)}{\sqrt{g h_L}}$  влиянием термогравитационных конвективных течений в окрестности капли можно пренебречь ( $Mar < 1$ ) [2].

Система уравнений для описания стационарной задачи будет иметь следующий вид [2–3]:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx}(\rho v x^2) &= 0 \frac{d}{dx}(\rho v^2 x^2) = \frac{d}{dx} \left( x^2 \mu \frac{dv}{dx} \right) - x^2 \frac{dp}{dx} \\ \frac{d}{dx}(\rho Y_i v x^2) &= \frac{d}{dx} \left( x^2 \rho D_i \frac{dY_i}{dx} \right) + \dot{M}_i, \quad i = 1, \dots, N \\ \frac{d}{dx}(\rho h v x^2) &= \frac{d}{dx} \left( x^2 \lambda \frac{dT}{dx} \right) + \frac{d}{dx} \left( x^2 \mu v \frac{dv}{dx} \right) + \frac{d}{dx} \left( x^2 \rho D_i \sum_{i=1}^N h_i \frac{dY_i}{dx} \right) \\ p &= \rho R T \sum_{i=1}^N \frac{Y_i}{m_i}. \end{aligned} \quad (1)$$

Граничные условия на поверхности раздела фаз  $x = x_w$ :

$$(\rho v)_g = (\rho v)_l = \dot{m}$$

$$(\rho v)_g Y_{gi} - (\rho D_i)_g \left. \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right|_{x \rightarrow x_w^+} = (\rho v)_l Y_{li} - (\rho D_i)_l \left. \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right|_{x \rightarrow x_w^-} = \dot{m}_i, i = 1, \dots, N \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N h_{Li} \dot{m}_i = \lambda_g \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x \rightarrow x_w^+} - \lambda_l \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x \rightarrow x_w^-}.$$

Предполагается, что скорости движения газа, вызванные наличием горения, незначительны, эффектами, связанными с трением и относительными изменениями давления, можно пренебречь. Тогда вместо уравнения количества движения в системе (1) будем применять условие гомобаричности ( $dp/dx = 0$ ). Для описания неравновесного испарения на поверхности фазового перехода будем использовать уравнение Герца–Кнудсена [3]:

$$\dot{m} = \delta_i \sqrt{\frac{m_i}{2\pi RT}} (p_i^*(T_w) - p_i).$$

Здесь и в дальнейшем введены следующие обозначения:  $m_i$  — молярная масса  $i$ -го компонента,  $\rho_i$  — плотность  $i$ -го компонента,  $\rho = \sum_{i=1}^N \rho_i$  — плотность смеси,  $Y_i = \frac{\rho_i}{\rho}$  — массовая концентрация  $i$ -го компонента,  $v$  — скорость смеси,  $p = \sum_{i=1}^N p_i$  — давление смеси,  $T$  — температура смеси,  $\dot{M}_i$  — массовая скорость рождения  $i$ -го компонента,  $h_i^o$  — удельная энтальпия образования  $i$ -го компонента,  $h = \sum_{i=1}^N Y_i h_i$  — удельная энтальпия всей смеси, где  $h_i = c_{pi} T + h_i^o$ ,  $h_{Li} = (h_i)_g - (h_i)_l$  — удельная теплота фазового перехода  $i$ -го компонента,  $\hat{c}_p = \sum_{i=1}^N Y_i c_{pi}$  — удельная теплоемкость смеси при постоянном давлении,  $\omega$  — средняя скорость брутто-реакции,  $\nu'_i, \nu''_i$  — стехиометрический коэффициент  $i$ -го компонента в реакции до и после соответственно,  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности,  $\Delta H = \frac{\sum_{i=1}^N m_i h_i^o (\nu'_i - \nu''_i)}{m_N (\nu'_N - \nu''_N)}$  — удельная теплота сгорания горючего,  $D$  — коэффициент диффузии,  $\Phi_i = \frac{m_i (\nu''_i - \nu'_i)}{m_1 (\nu''_1 - \nu'_1)}$  — стехиометрическое отношение,  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости,  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$  — коэффициент Пуассона (показатель адиабаты).

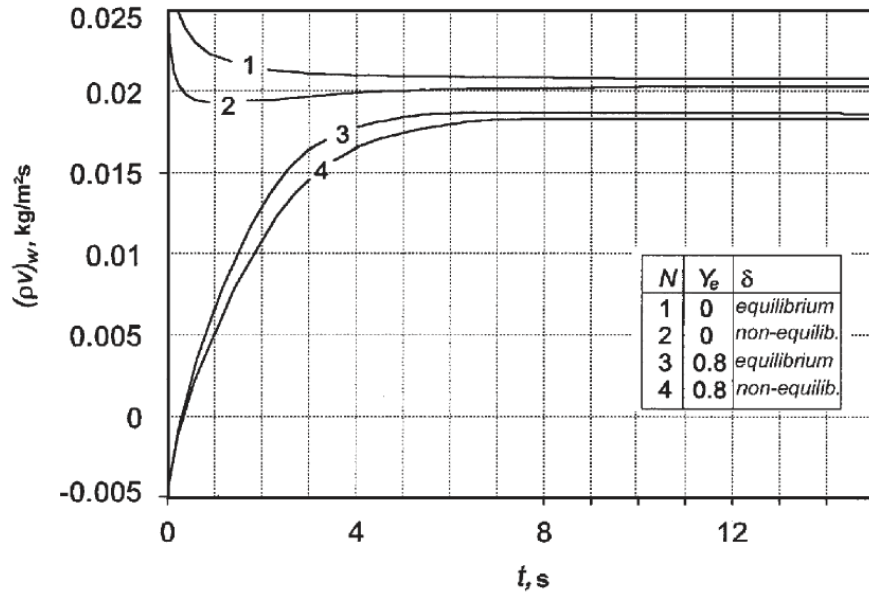
Индексы:  $g$  — газ,  $l$  — жидкость,  $w$  — поверхность фазового перехода,  $e$  — бесконечность,  $*$  — поверхность пламени.

Решение нестационарной задачи испарения капли показывает (рис. 2), что существенно нестационарная стадия достаточно быстро выходит на квазистационарный режим. Решения, полученные в рамках равновесной и неравновесной моделей, отличаются на обеих стадиях. При уменьшении радиуса капли различие между решениями, полученными в рамках равновесной и неравновесной моделей, сильно возрастает.

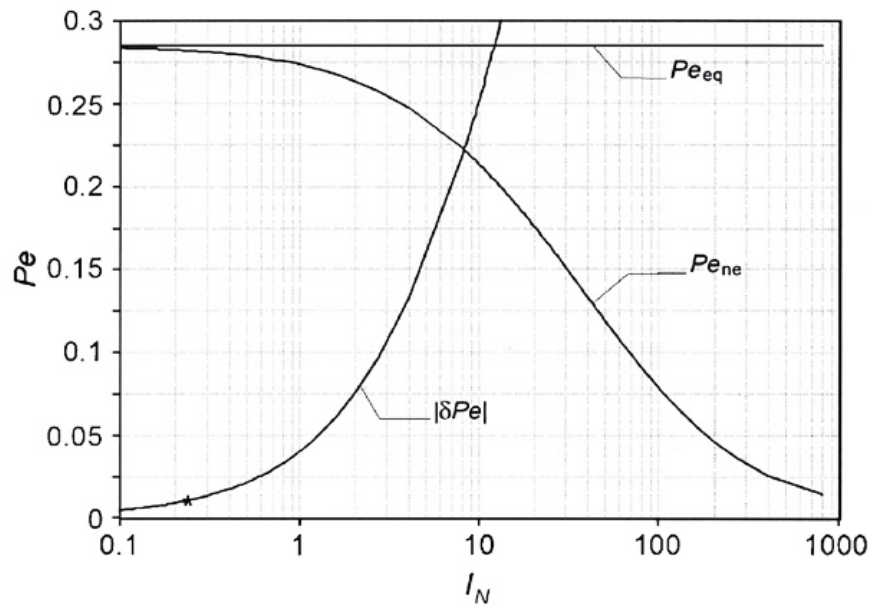
Число Пекле  $Pe = \frac{\dot{m} x_w}{\rho D}$  является безразмерной характеристикой скорости испарения. Влияние неравновесных эффектов на процесс фазового перехода характеризуется безразмерным критерием  $I_N = \frac{\lambda}{\rho A_p \delta_N x_w} \sqrt{\frac{2\pi}{R_e T_e}}$ . На рис. 3 представлены графики зависимости равновесного и неравновесного чисел Пекле и их разницы  $\delta Pe = (Pe_{ne} - Pe_{eq})/Pe_{eq}$  от значений критерия для следующих значений параметров:

$$\frac{m_i}{m_N} = 4.75, \quad \chi_L = 0.54, \quad \frac{p_0}{p_e} = 1, \quad Y_{Ne} = 0.1, \quad \Gamma_{eW} = 1, \quad \chi_{ho} = 0.9.$$

На рис. 4 приведены результаты решения задачи испарения одиночной капли. Скорость выгорания капли может быть определена из уравнения  $\frac{dx_w}{dt} = -\frac{\dot{m}}{\rho_{Nl}}$ , которое, введя безразмерные переменные



**Рис. 2.** Решение нестационарной задачи: зависимость массовой скорости испарения от времени для различных начальных концентраций паров в окружающей атмосфере и различных моделей испарения



**Рис. 3.** Графики зависимости равновесного и неравновесного чисел Пекле и их разницы от значений критерия

$r = \frac{x_w}{x_{w0}}$  и  $\tau = \frac{t}{t_0}$ , преобразуем к виду  $2r \frac{dr}{d\tau} = -\frac{Pe}{Pe_{eq}} = -\Psi_s(r)$ ,  $r(0) = 1$ . Причем при  $Pe_e = Pe_{eq}$   $\Psi_s \equiv 1$ , а в неравновесном случае  $\Psi_s \approx \exp(-\frac{kI_{N0}^2}{r})$ .

Из графиков (рис. 4) видно, что при изменении начального значения параметра неравновесности время испарения существенно меняется.

Полученные точные решения задач испарения сферических капель позволяют сравнить результаты неравновесных и равновесных моделей и определить пределы применимости квазиравновесного подхода. Различия квазиравновесных и неравновесных решений возрастают при уменьшении радиуса капель и увеличении коэффициента диффузии. Найден безразмерный критерий, характеризующий степень отклонения законов испарения капель от квазиравновесных. Неравновесные модели более адекватно описывают финальные стадии испарения капель, а также более точно определяют время испарения.

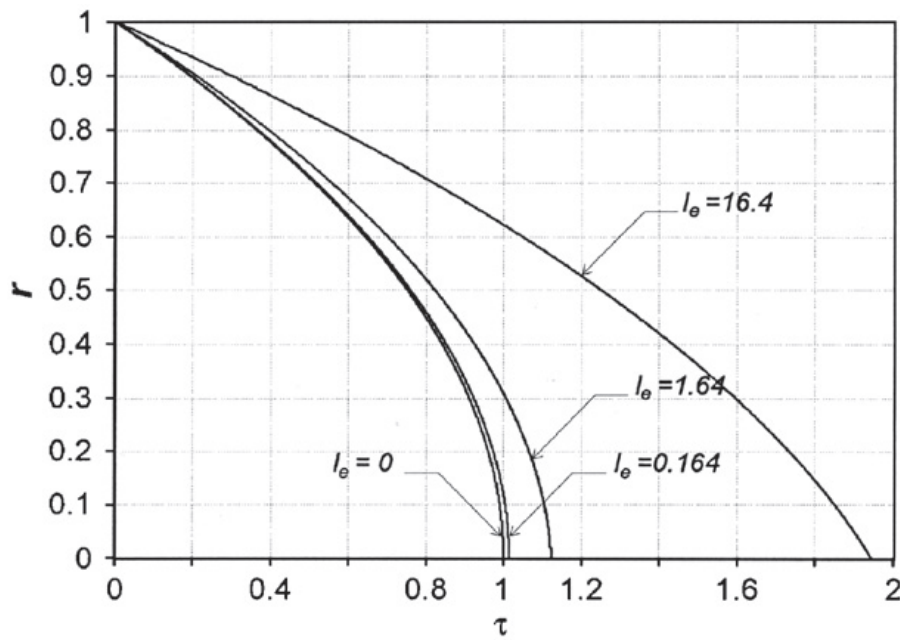


Рис. 4. Результаты решения задачи испарения одиночной капли

#### Взаимодействие отдельной капли при движении в нагретом газе

Макрокинетика процессов горения многофазных смесей включает модели турбулентного течения несущей газовой фазы с учетом влияния взвешенных частиц (притоков массы, количества движения и энергии от них), модели динамики частиц с учетом взаимодействия с турбулентными вихрями, модели фазовых переходов и дробления частиц, кинетического механизма химических реакций. Детали моделей изложены в работах [4–7].

Эволюция скорости и диаметра капель при испарении и торможении в нагретом газе, изменение средней температуры капель для различных начальных диаметров представлены на рис. 5–7.

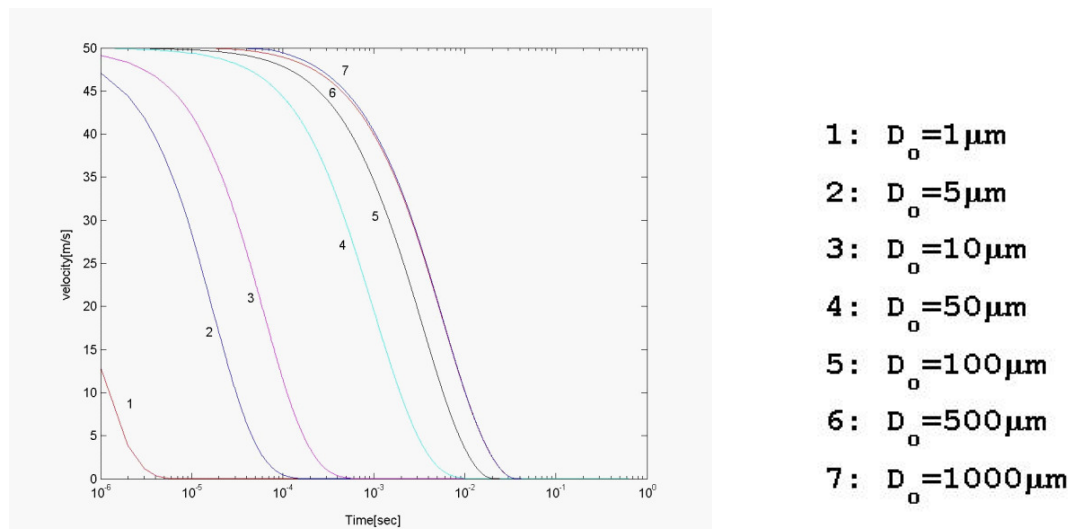
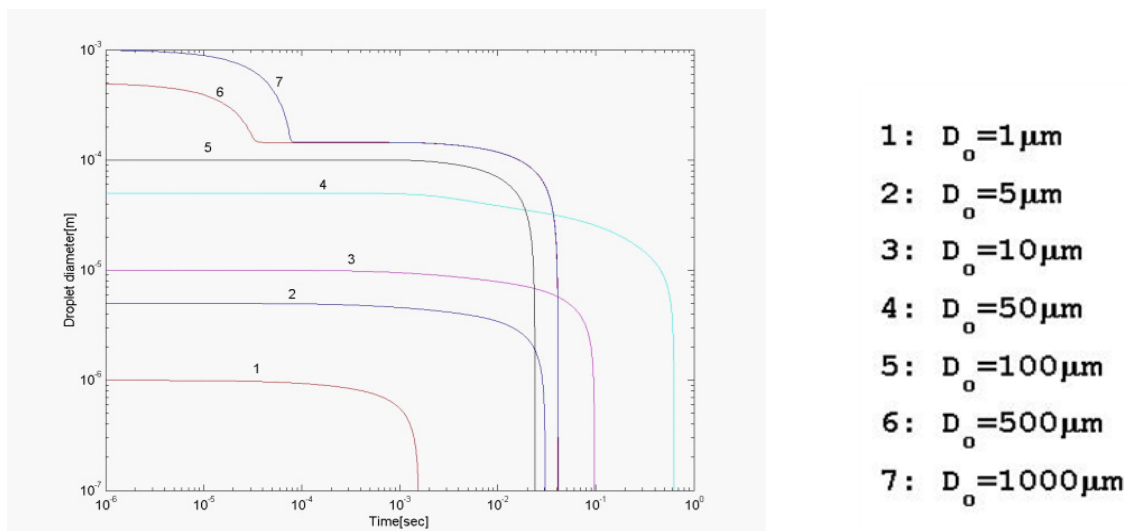
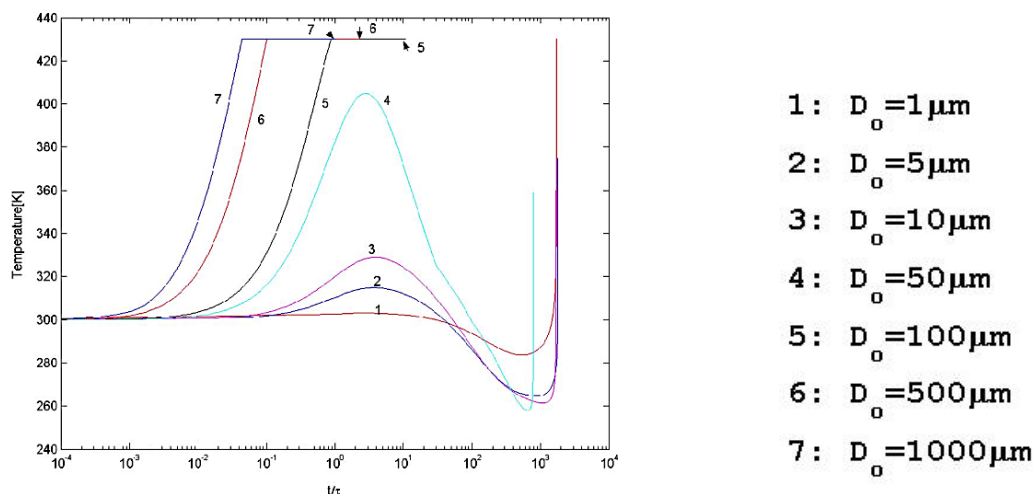


Рис. 5. Эволюция скорости капель различных диаметров при торможении в нагретом газе. Начальная скорость = 50 м/с

Выделено два сценария взаимодействия капель с горячим газовым потоком и испарения. Относительно малые капли последовательно претерпевают нагрев, охлаждение вследствие теплотерь на испарение и затем быстрый нагрев до полного испарения. Более крупные капли могут быть сразу нагреты при торможении до критической температуры и быстро испариться. Дробление капель существенно влияет на сценарий их нагрева и испарения.



**Рис. 6.** Изменение размеров капель различных начальных диаметров при испарении в нагретом газе.  
Начальная скорость = 50 m/s



**Рис. 7.** Зависимость средней температуры капель от приведенного времени, отнесенного ко времени из торможения в атмосфере ( $\tau = v_0/a_0$ ,  $a_0 = f_d(t=0)/m_0$ )

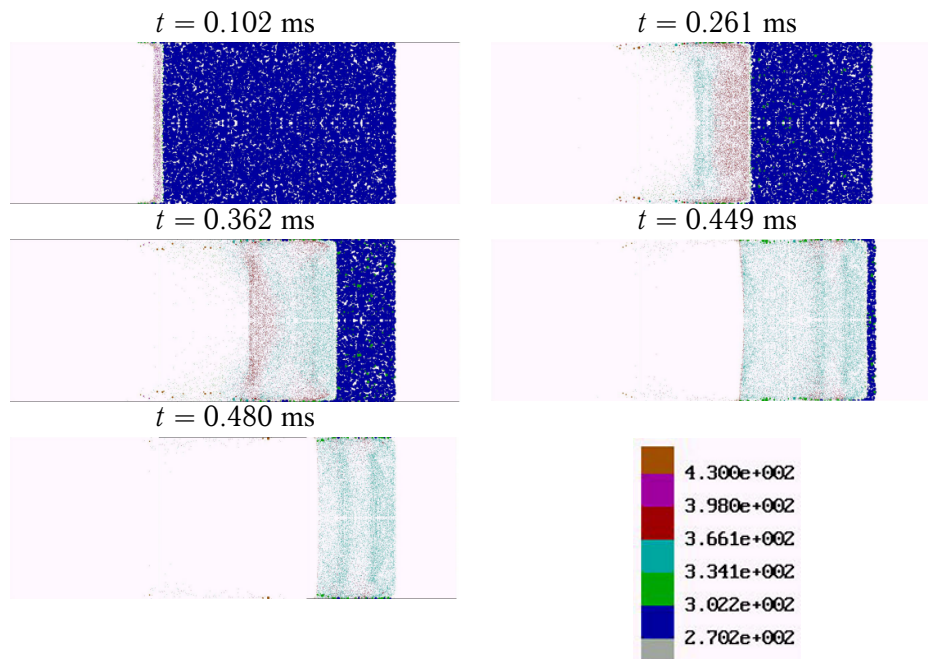
Эволюция струи горючего газа, вдуваемой в высокотемпературный газ, имеет три характерных стадии: быстрое испарение и охлаждение окружающего газа, удлинение струи в охлажденной атмосфере, воспламенение паров, повышение температуры и уменьшение капельной струи.

### Иницирование детонации в полидисперсных смесях

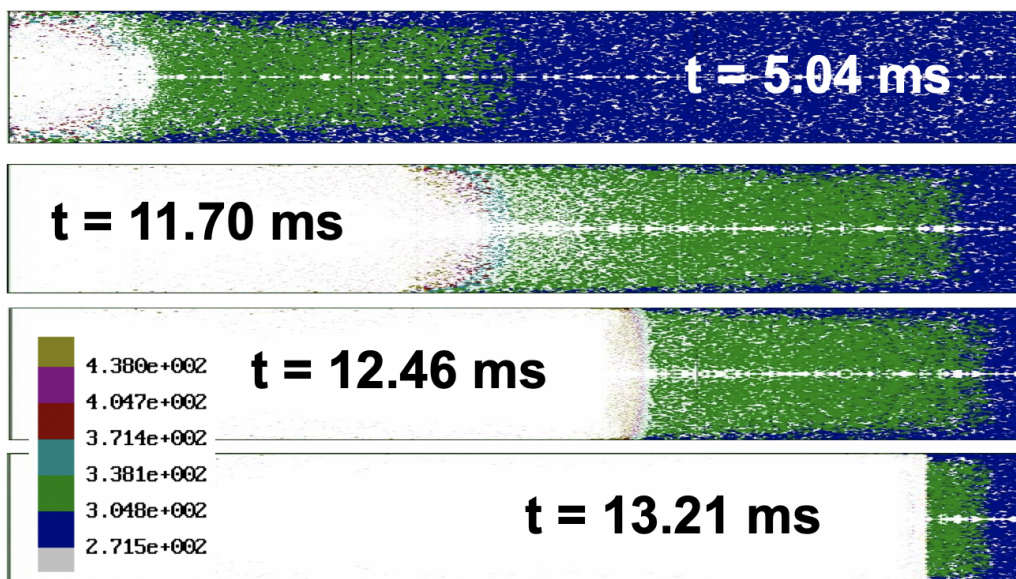
С использованием разработанной и верифицированной модели горения полидисперсных смесей [8] были рассмотрены задачи иницирования детонации ударными волнами и при мягком зажигании с последующим переходом горения в детонацию. Результаты представлены на рис. 8–11.

Установлено, что конвективное горение в аэродисперсных смесях может привести либо к галопирующему режиму, либо к установлению детонации. Увеличение начальной температуры смеси, давления, энергии зажигания и уменьшение времени экспозиции энергии зажигания способствует ускорению пламени. Ударная волна сильно затухает при входе в облако капель. Затем при воспламенении паров возможно ее ускорение и возникновение детонационного режима. Предетонационное время существенно зависит от функции распределения капель по размерам в аэрозвеси.

### Повышение быстродействия вычислительного моделирования



**Рис. 8.** Последовательные стадии распространения ударной волны в полидисперсной смеси углеводородного горючего с треугольной функцией распределения размеров капель: средний диаметр 50 мкм, минимальный 10 мкм, максимальный 100 мкм

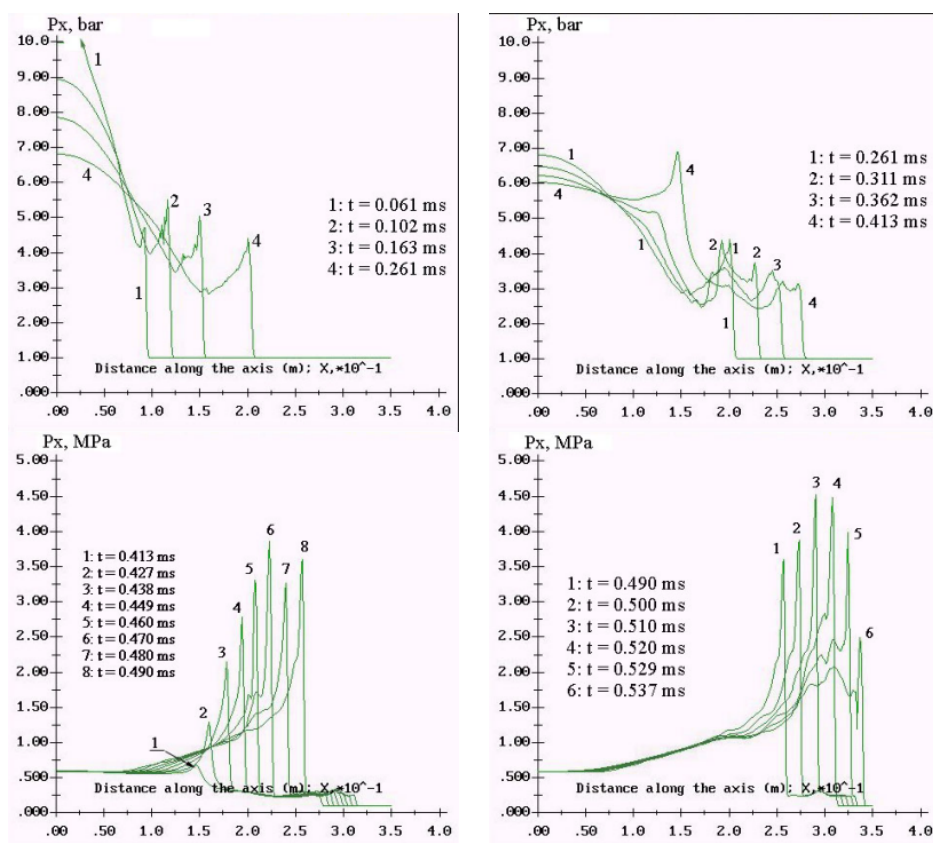


**Рис. 9.** Переход конвективного горения полидисперсной смеси в детонацию

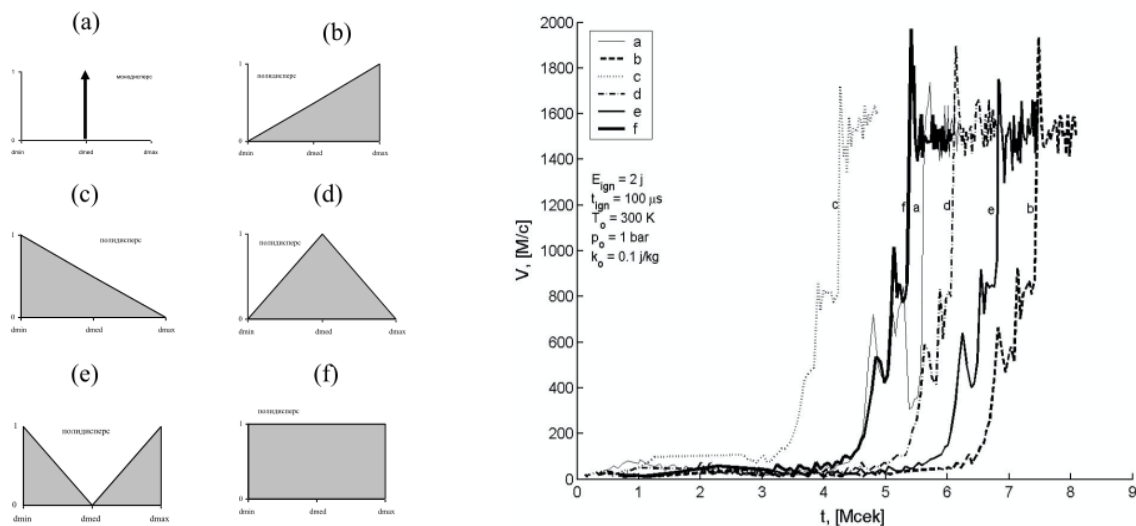
Эффективным способом повышения быстродействия вычислительного моделирования являются параллельные вычисления на многопроцессорных суперЭВМ. Основными проблемами, возникающими в процессе моделирования физико-химической газовой динамики полидисперсных смесей, являются:

- а) многомасштабность, не позволяющая проводить моделирование всех задействованных процессов на единых даже масштабируемых сетках;
- б) жесткость и большая размерность системы дифференциальных уравнений для описания химической кинетики, решение которой может занимать 80 % процессорного времени.

Простейшая модель ускорения расчетов при применении параллельных алгоритмов вычислений показывает ограниченность возможности ускорения при подключении дополнительных процессоров [9–11], а именно ускорение расчетов при выполнении параллельных вычислений по отношению



**Рис. 10.** Профили давления за ударной волной в полидисперсной смеси углеводородного горючего с треугольной функцией распределения размеров капель: средний диаметр 50 мкм, минимальный 10 мкм, максимальный 100 мкм



**Рис. 11.** Изменение скорости фронта реакции при переходе горения в детонацию в полидисперсных смесях с различным распределением капель по размерам

к последовательному алгоритму обычно определяется из соотношения (рис. 12), выражающего закон Амдала, который иллюстрирует ограничение роста производительности вычислительной системы с увеличением количества вычислителей. Джин Амдал сформулировал закон в 1967 году, обнаружив простое по существу, но непреодолимое по содержанию ограничение на рост производительности при

распараллеливании вычислений. В случае, когда задача разделяется на несколько частей, суммарное время её выполнения на параллельной системе не может быть меньше времени выполнения самого длинного фрагмента. Согласно этому закону ускорение выполнения программы за счёт распараллеливания её инструкций на множестве вычислителей ограничено временем, необходимым для выполнения её последовательных инструкций.

Однако, если мы примем во внимание обменные процессы между процессорами и памятью и пересылки данных между различными разделами памяти, количество которых возрастает с увеличением параллельных процессов исполнения алгоритма, то закон Амдала нуждается в модификации (рис. 12), которая показывает, что неограниченное возрастание параллельных нитей приведет к снижению эффективности ускорения.

На рис. 12 в формулах использованы следующие обозначения:  $T_{suc}$  — время последовательного исполнения алгоритма,  $T_{par}$  — время решения задачи с учетом распараллеливания на некоторое количество вычислителей  $p$ ,  $\alpha$  — часть программы, которая принципиально не может быть распараллелена и должна исполняться в последовательном режиме,  $\tau$  — среднее время единичного обменного процесса,  $n$  — количество шагов вычислений.

В результате проведенного анализа показано, что простое наращивание мощности компьютеров не дает гарантий эффективного решения многомасштабных задач горения в технических и природных системах [12]. Необходима адаптация архитектуры суперкомпьютеров и механизмов обменных процессов для решения конкретного класса многомасштабных задач.

## Закон Амдала и его модификация

$$T_{suc}\alpha + \frac{T_{suc}(1-\alpha)}{p} = T_{par} \quad A_c = \frac{T_{suc}}{T_{par}} \quad A_c = \frac{T}{T_P} = \frac{1}{\alpha + \frac{1-\alpha}{p}}$$

- Учет времени пересылки информации между параллельными процессами

$$T_{suc}\alpha + \frac{T_{suc}(1-\alpha)}{p} + n\tau p = T_{par} \quad A_c = \frac{1}{\alpha + \frac{1-\alpha}{p} + p\frac{n\tau}{T_{suc}}} \quad \frac{\tau}{T_{suc}} \ll 1$$

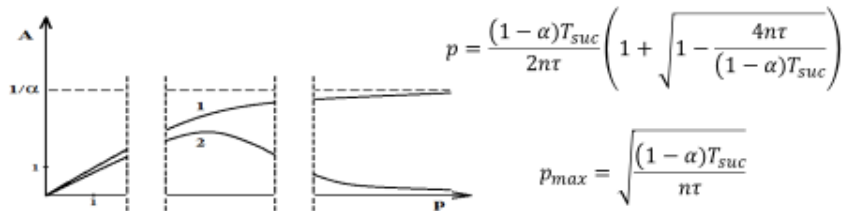
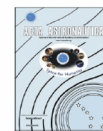


Рис. 12. Ограничения на ускорения вычислений при распараллеливании алгоритма

Для решения проблемы сокращения времени интегрирования уравнений многостадийной химической кинетики актуальным трендом является применение нейросетевых подходов и методов в рамках разрабатываемых вычислительных моделей. Этот подход в настоящее время развивается коллективом отдела вычислительных систем совместно с коллективом Центра оптико-нейронных технологий ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН [13] (рис. 13). Замена интегрирования системы «жестких» дифференциальных уравнений нейросетевым алгоритмом с возможностью его реализации в кремнии в качестве сопроцессора позволит существенно ускорить вычисления. Такое ускорение возможно за счет потери универсальности: нейросеть сможет рассчитывать только один механизм, на который она обучена. Однако обучение нейросети можно провести с любой наперед заданной точностью, поскольку размеры обучающей и контрольной выборки в данном случае ничем не ограничены, кроме времени проведения детальных кинетических расчетов, но такие расчеты надо будет провести всего один раз.

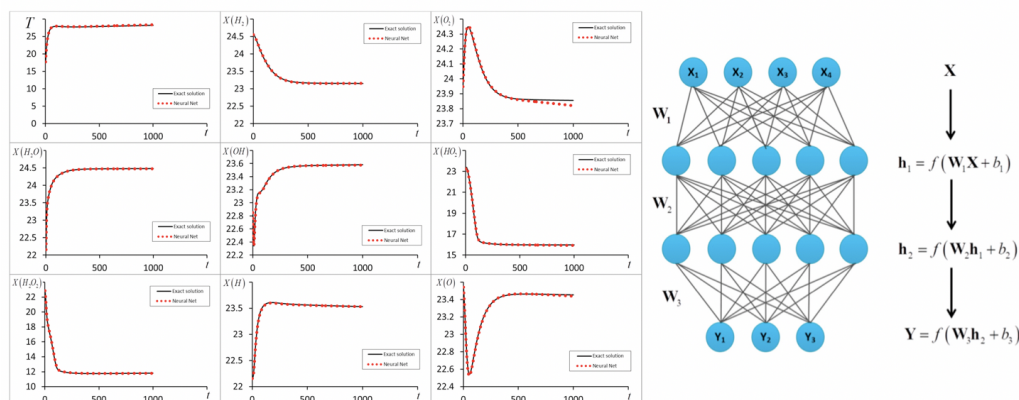
## Заключение



## Neural network approach to solve gas dynamics problems with chemical transformations

V.B. Betelin, B.V. Kryzhanovsky, N.N. Smirnov, V.F. Nikitin, I.M. Karandashev, M.Yu. Malsagov, E.V. Mikhalechenko

Federal Science Center «Scientific Research Institute for System Analysis of Russian Academy of Sciences», 36-1 Nakhimovskiy pr., Moscow, 117218, Russia



**Рис. 13.** Применение нейросетей для моделирования химической кинетики при проведении газодинамических расчетов

В статье представлен обзор уже проведенных исследований по вычислительному моделированию многомасштабных задач горения, проведен анализ трудностей, с которыми столкнулись исследователи.

Анализ проблем, связанных с вычислительным моделированием многомасштабных процессов горения в гетерогенных системах, показывает, что все возрастающая сложность и многоуровневость моделей требует разработки новых подходов к созданию аппаратно-программных вычислительных комплексов. Нарастание мощности компьютеров и параллельных процессов не дает гарантий эффективного решения многомасштабных задач горения. Необходима адаптация архитектуры суперкомпьютеров и механизмов обменных процессов для решения конкретного класса многомасштабных задач. Замена решения трудоемких задач химической кинетики нейросетевыми алгоритмами с возможностью их реализации в кремнии в качестве сопроцессоров позволит существенно ускорить вычисления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Makhviladze G. M., Roberts J. P., Yakush S. E. Combustion of Two-Phase Hydrocarbon Fuel Clouds Released into the Atmosphere. *Combustion and Flame*. 1999;118:583–605.
2. Dushin V. R., Smirnov N. N., Kulchitskiy A. V., Nerchenko V. A., Nikitin V. F., Osadchaya E. S., Phylippov Yu. G. Mathematical Simulation for Non-Equilibrium Droplet Evaporation. *Acta Astronautica*. 2008;63:1360–1371.
3. Tyurenkova V. V., Smirnov N. N., Guendugov V. M. Analytical Solution for a Single Droplet Diffusion Combustion Problem Accounting for Several Chain Reaction Stages. *Acta Astronautica*. 2013;83:208–215.
4. Smirnov N. N., Nikitin V. F., Legros J. C. Ignition and Combustion of Turbulized Dust-Air Mixtures. *Combustion and Flame*. 2000;123(1):46–67.
5. Betelin V. B., Smirnov N. N., Nikitin V. F., Dushin V. R., Kushnirenko A. G., Nerchenko V. A. Evaporation and Ignition of Droplets in Combustion Chambers Modeling and Simulation. *Acta Astronautica*. 2012;70:23–35. DOI: 10.1016/j.actaastro.2011.06.021.

6. Smirnov N. N., Betelin V. B., Kushnirenko A. G., Nikitin V. F., Dushin V. R., Nerchenko V. A. Ignition of Fuel Sprays by Shock Wave Mathematical Modeling and Numerical Simulation. *Acta Astronautica*. 2013;87:14–29.
7. Smirnov N. N., Nikitin V. F., Dushin V. R., Phylippov Yu. G., Nerchenko V. A., Khadem J. Combustion Onset in Non-Uniform Dispersed Mixtures. *Acta Astronautica*. 2015;115:94–101.
8. Смирнов Н. Н., Тюренкова В. В., Стамов Л. И., Хадем Дж. Вычислительное моделирование течений полидисперсных газокапельных смесей с химическим превращениями. *Успехи кибернетики*. 2021;2(2):29–41. DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-2-3.
9. Amdahl G. M. Validity of the Single Processor Approach to Achieving Large Scale Computing Capabilities. *AFIPS Conf. Proc.* 1967;30:483–485.
10. Gustafson J. L. Reevaluating Amdahl's Law. *Communications of the ACM*. 1988;31(5):532–533.
11. Amdahl G. M. Computer Architecture and Amdahl's Law. *Computer*. 2013;46(12):38–46.
12. Смирнов Н. Н. Высокопроизводительные вычисления в задачах предсказательного моделирования. *Вестник кибернетики*. 2016;2:112–116.
13. Betelin V. B., Kryzhanovsky B. V., Smirnov N. N., Nikitin V. F., Karandashev I. M., Malsagov M. Yu., Mikhachenko E. V. Neural Network Approach to Solve Gas Dynamics Problems with Chemical Transformations. *Acta Astronautica*. 2021;180:58–65.