

---

---

## ТРУДЫ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

---

---

Научная статья

УДК 614.841.4; 614.844; DOI: 10.61260/2218-130X-2026-1-135-147

### **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРЕНИЯ ГЕПТАН-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ПОЛОСТИ УСТРОЙСТВА ПОЖАРОТУШЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ДЕЙСТВИЯ В ANSYS FLUENT**

✉ **Иванов Андрей Владимирович.**

**Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия**

✉ *andrei-ivanov84@mail.ru*

*Аннотация.* Представлены результаты численного моделирования нестационарных газодинамических и тепловых процессов, протекающих при горении стехиометрической смеси паров гептана с воздухом в полужакрытой цилиндрической трубе, моделирующей газогенерирующую полость устройства пожаротушения импульсного действия. Актуальность исследования определяется необходимостью создания достоверной физико-математической основы для описания рабочего процесса газогенерации, являющейся предпосылкой проектирования устройств пожаротушения с повышенными характеристиками. Моделирование выполнено в программном комплексе ANSYS Fluent 2023 R1 с применением нестационарных уравнений Навье-Стокса для сжимаемого реагирующего многокомпонентного газа, модели турбулентности  $k$ - $\epsilon$  realizable и модели горения Species Transport с кинетикой окисления по закону Аррениуса.

По результатам расчета получены пространственно-временные распределения температуры и давления на пяти характерных стадиях процесса. Показано, что температура газа в зоне реакции возрастает с 1 653 К при инициации до 4 884 К на стадии развитого горения у закрытого торца, а затем стабилизируется на уровне  $\sim 3$  100 К к моменту полного выгорания смеси. Максимальное давление у закрытого торца достигает 4,2 атм при скорости нарастания  $\sim 5,1$  атм/с. Установлено, что ускорение фронта пламени реализуется по механизму Шелкина вследствие взаимодействия расширяющихся продуктов сгорания с непрогоревшей смесью. Скорость истечения горячих газов из открытого торца в начальной фазе выброса достигает звуковых значений. Полученные данные верифицированы на основе аналитических оценок адиабатической температуры горения и нормальной скорости ламинарного фронта и формируют базовые граничные условия для последующих расчетных этапов.

*Ключевые слова:* ANSYS Fluent, численное моделирование, горение паров гептана, фронт пламени, газодинамика, устройство пожаротушения импульсного действия, эффект Шелкина, температурное поле, динамика давления, вычислительная гидродинамика

**Для цитирования:** Иванов А.В. Численное моделирование нестационарных газодинамических характеристик горения гептан-воздушной смеси в полости устройства пожаротушения импульсного действия в ANSYS Fluent // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2026. № 1. С. 135–147. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-1-135-147

Scientific article

## NUMERICAL SIMULATION OF NONSTATIONARY GAS DYNAMIC CHARACTERISTICS OF GORENJE OF HEPTANE-AIR MIXTURE IN CAVITY OF A PULSE FIRE EXTINGUISHING DEVICE IN ANSYS FLUENT

✉ Ivanov Andrey V.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉✉ [andrei-ivanov84@mail.ru](mailto:andrei-ivanov84@mail.ru)

*Abstract.* The article presents the results of numerical simulation of unsteady gas-dynamic and thermal processes occurring during combustion of a stoichiometric mixture of heptane vapors with air in a semi-closed cylindrical tube simulating the gas-generating cavity of a pulse-action fire extinguishing device. The relevance of the study is determined by the need to create a reliable physical and mathematical basis for describing the working process of gas generation, which is a prerequisite for designing fire extinguishing devices with enhanced characteristics. The simulation was performed in the ANSYS Fluent 2023 R1 software package using unsteady Navier-Stokes equations for a compressible reacting multicomponent gas, a k-ε realizable turbulence model and a Species Transport combustion model with oxidation kinetics according to the Arrhenius law.

Based on the calculation results, the spatial and temporal distributions of temperature and pressure at five characteristic stages of the process are obtained. It is shown that the gas temperature in the reaction zone increases from 1 653 K at initiation to 4 884 K at the stage of advanced combustion at the closed end, and then stabilizes at the level of ~3 100K by the time the mixture is completely burned out. Gorenje. The maximum pressure at the closed end reaches 4,2 atm with an increase rate of ~5,1 atm/s. It is established that the acceleration of the flame front is realized by the Shelkin mechanism due to the interaction of expanding combustion products with an unburned mixture. The velocity of hot gases escaping from the open end in the initial phase of the ejection reaches sound values. The data obtained are verified based on analytical estimates of the adiabatic gorenje temperature and the normal velocity of the laminar front and form the basic boundary conditions for subsequent calculation stages.

*Keywords:* ANSYS Fluent, numerical simulation, gorenje vapor heptane, flame front, gas dynamics, pulse fire extinguishing device, Shelkin effect, temperature field, pressure dynamics, computational fluid dynamics

**For citation:** Ivanov A.V. Numerical simulation of nonstationary gas dynamic characteristics of gorenje of heptane-air mixture in cavity of a pulse fire extinguishing device in ANSYS Fluent // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2026. № 1. P. 135–147. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-1-135-147

### Введение

Практика тушения пожаров углеводородных жидкостей свидетельствует о том, что существенная часть потерь личного состава и техники обусловлена вынужденной работой в зоне с недопустимым уровнем теплового излучения [1, 2]. Одним из системных решений данной проблемы является разработка устройств пожаротушения импульсного действия, обеспечивающих концентрированное вытеснение огнетушащего вещества (ОВ) на увеличенное расстояние за счет высокого импульса давления [3, 4]. Принципиально новым подходом, не требующим применения баллонов со сжатым газом или пиротехнических газогенераторов, является использование продуктов сгорания жидких углеводородов в качестве вытесняющего агента [5, 6].

Ключевым физическим процессом в таком устройстве является горение топливно-воздушной смеси в полости устройства пожаротушения. Параметрами этого процесса являются скорость нарастания давления, максимальное давление, скорость распространения фронта пламени, которые непосредственно определяют амплитуду и форму вытесняющего импульса [7, 8]. Понимание и корректное описание данных параметров представляет собой необходимое условие рационального проектирования устройства.

Горение углеводородов в трубах с одним закрытым торцом представляет собой класс задач, отличающихся тесным взаимодействием химических реакций, тепломассообмена и волновой газодинамики сжимаемого газа [9, 10]. Ламинарный фронт пламени, возникающий при воспламенении смеси у закрытого торца, ускоряется по механизму Шелкина. При этом расширение продуктов сгорания ускоряет течение не прогоревшей смеси, турбулизирует поток и увеличивает площадь фронта, что экспоненциально нарастает вплоть до формирования детонационного режима при достаточной длине трубы [11, 12]. Одновременно у закрытого торца возникают отраженные волны сжатия, повышающие локальное давление в 5–10 раз по сравнению с начальным [13].

Экспериментальное исследование этих процессов сопряжено со значительными методическими трудностями ввиду их высокой скоротечности и малых характерных масштабов. Методы вычислительной гидродинамики (CFD), реализованные в таких программных комплексах, как ANSYS Fluent, предоставляют возможность детальной визуализации пространственно-временной структуры течения и количественного анализа распределений всех ключевых параметров [14, 15]. Перспективность CFD-моделирования применительно к задачам пожаротушения подтверждена публикациями [16, 17].

Вместе с тем в открытых источниках отсутствуют работы, посвящённые численному анализу газодинамики горения углеводородов именно в конфигурации полузакрытой трубы, применительно к устройствам пожаротушения импульсного действия. Детальное изучение базовой конфигурации, без каких-либо вставок и нагрузок, является необходимым первоначальным шагом, создающим аналитическую основу для последующего сравнительного исследования влияния различных конструктивных элементов устройства.

Таким образом, целью настоящей работы является численное исследование нестационарных газодинамических процессов горения стехиометрической смеси паров гептана с воздухом в цилиндрической трубе (полости) устройства пожаротушения импульсного действия, получение пространственно-временных распределений температуры и давления, а также выявление ключевых физических механизмов, определяющих параметры импульса давления.

Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

1. Разработать математическую модель горения гептан-воздушной смеси в полузакрытой трубе в ANSYS Fluent и реализовать численный расчет.
2. Получить и проанализировать распределения температуры, давления и скорости газа на последовательных стадиях горения.
3. Установить физические механизмы ускорения фронта пламени и формирования волновых структур давления.
4. Определить базовые газодинамические характеристики: максимальное давление, скорость его нарастания, время достижения максимума.

## Метод исследования

### *Физическая модель процесса.*

Рассматривается горение стехиометрической смеси паров гептана с воздухом в цилиндрической трубе длиной 500 мм и внутренним диаметром 30 мм. Правый торец трубы закрыт жёсткой стенкой, левый торец открыт и сообщается с атмосферой. В начальный момент времени труба полностью заполнена горючей смесью при температуре 300 К и атмосферном давлении, смесь находится в покое.

Инициация горения задаётся путём создания локального очага с температурой 2 000 К вблизи закрытого торца объёмом  $\sim 1 \text{ см}^3$ , в котором горючая смесь заменяется продуктами сгорания ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ). Такая постановка соответствует экспериментальной схеме, когда воспламенение производится нагревательным элементом спиралевидного типа [8].

Физика процесса включает несколько взаимосвязанных этапов. Горячий очаг передаёт тепло прилегающим холодным слоям смеси посредством теплопроводности и диффузии активных радикалов. По достижении температуры самовоспламенения паров гептана ( $\sim 500\text{--}600 \text{ К}$ ) в соседнем слое запускается экзотермическая реакция окисления  $\text{C}_7\text{H}_{16} + 11\text{O}_2 \rightarrow 7\text{CO}_2 + 8\text{H}_2\text{O}$  с выделением теплоты сгорания 44,6 МДж/кг. В адиабатных условиях при атмосферном давлении этому соответствует адиабатическая температура продуктов горения  $\sim 2\,200\text{--}2\,400 \text{ К}$ . Формируется устойчивый фронт пламени – тонкая зона (1 мм), в которой происходит переход от реагентов к продуктам сгорания.

Расширение продуктов сгорания (объёмный коэффициент расширения 7–8) ускоряет поток не прогоревшей смеси перед фронтом пламени и инициирует механизм Шелкина, когда ускоряющийся поток турбулизует фронт, увеличивает его поверхность и эффективную скорость горения, что ведёт к экспоненциальному нарастанию скорости распространения пламени [13]. Одновременно у закрытого торца накапливаются отражённые волны сжатия, повышающие локальное давление в 5–10 раз по сравнению с атмосферным. У открытого торца формируется волна разрежения, распространяющаяся навстречу фронту.

*Математическая постановка задачи.*

Математическая модель основана на системе уравнений Навье-Стокса для сжимаемого реагирующего многокомпонентного газа [18, 19]. Для замыкания используется уравнение состояния идеального газа с переменным молекулярным весом. Уравнения сохранения массы (1), сохранения импульса (2), сохранения энергии (3) и переноса  $i$ -го компонента (4) представлены ниже:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho u = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho u \circ u) = -\nabla P + \nabla \tau + \rho g, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla u(\rho E + P) = \nabla(\lambda \nabla T - \sum h_i \cdot J_i) + Sh, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla(\rho u Y_i) = -\nabla J_i + R_i, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность газа;  $u$  – вектор скорости;  $P$  – давление;  $\tau$  – тензор вязких напряжений;  $E$  – полная удельная энергия;  $T$  – температура;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $h_i$  – энтальпия  $i$ -го компонента;  $Y_i$  – массовая доля  $i$ -го компонента;  $J_i$  – диффузионный поток  $i$ -го компонента;  $R_i$  – массовая скорость его образования в химических реакциях;  $Sh$  – объёмный источник тепла.

Для моделирования турбулентности применяется реализуемая  $k$ - $\varepsilon$  модель, показавшая надёжную точность при расчётах течений с интенсивными сдвиговыми и отрывными зонами [20]:

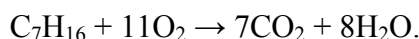
$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho u k) = \nabla \left[ \left( \mu + \frac{\mu t}{\sigma k} \right) \nabla k \right] + Gk + Gb - \rho \varepsilon,$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho u \varepsilon) = \nabla \left[ \left( \mu + \frac{\mu t}{\sigma \varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_1 \varepsilon \cdot \left( \frac{\varepsilon}{k} \right) \cdot (Gk + C_3 \varepsilon \cdot Gb) - \frac{C_2 \varepsilon \cdot \rho \varepsilon^2}{k},$$

где  $k$  – кинетическая энергия турбулентности;  $\varepsilon$  – скорость диссипации турбулентности;  $\mu t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$  – турбулентная вязкость;  $Gk$ ,  $Gb$  – генерация  $k$  за счёт градиентов скорости и подъёмной силы соответственно;  $C_1 \varepsilon$ ,  $C_2 \varepsilon$ ,  $C_3 \varepsilon$ ,  $C_\mu$ ,  $\sigma k$ ,  $\sigma \varepsilon$  – модельные константы.

*Кинетическая модель горения.*

Для описания реакции горения используется модель переноса компонентов (Species Transport) с упрощённой одностадийной схемой:



Скорость реакции задается по закону Аррениуса:

$$R = A \cdot \exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right) \cdot [\text{C}_7\text{H}_{16}]^\alpha \cdot [\text{O}_2]^\beta,$$

где  $A = 8,6 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$  – предэкспоненциальный множитель;  $Ea = 125 \text{ кДж/моль}$  – энергия активации;  $\alpha = 0,25$ ;  $\beta = 1,5$  – частичные порядки реакции по горючему и окислителю [15]. Тепловой эффект реакции принят равным теплоте сгорания гептана  $44,6 \text{ МДж/кг}$ .

*Расчётная область и граничные условия.*

На правом (закрытом) торце задается условие непротекания (wall, no-slip,  $\partial T/\partial n = 0$ ). На левом (открытом) торце – условие выхода в атмосферу (pressure outlet,  $P_{\text{вых}} = 101\,325 \text{ Па}$ ). На боковой поверхности трубы – условие прилипания (no-slip) с адиабатическими стенками ( $\partial T/\partial n = 0$ ), что оправдано малым временем процесса ( $< 1 \text{ с}$ ), при котором тепловые потери в стенку пренебрежимо малы.

Начальные условия ( $t = 0$ ):

- температура газовой смеси:  $T_0 = 300 \text{ К}$  (во всём объёме, кроме очага инициации);
- давление:  $P_0 = 101325 \text{ Па}$ ;
- состав смеси: стехиометрическая смесь паров  $\text{C}_7\text{H}_{16}$  с воздухом (массовая доля гептана  $6,25 \%$ , кислорода  $21,73 \%$ , азота  $72,02 \%$ );
- скорость:  $u_0 = 0$ .

В области инициации ( $\sim 1 \text{ см}^3$  у закрытого торца):

- температура:  $T = 2\,000 \text{ К}$ ;
- состав: продукты сгорания ( $\text{CO}_2 \sim 19,0 \%$ ,  $\text{H}_2\text{O} \sim 11,8 \%$ ,  $\text{N}_2 \sim 69,2 \%$  по массе).

*Параметры численного расчёта.*

Пространственная дискретизация выполнена на неструктурированной тетраэдральной сетке с призматическими пристеночными слоями. Общее количество ячеек составило  $\sim 1,8 \text{ млн}$ . Высота пристеночных ячеек выбрана из условия  $y^+ = 30\text{--}100$  (логарифмический закон стенки). Параметры численной схемы:

- алгоритм связи давление–скорость – SIMPLE;
- временная дискретизация – неявная схема первого порядка;
- дискретизация конвективных членов – Second Order Upwind;
- шаг по времени – адаптивный,  $\Delta t = 1 \times 10^{-5} \text{--} 1 \times 10^{-4} \text{ с}$  при числе Куранта  $\text{CFL} \leq 0,5$ ;
- критерий сходимости итерационного процесса на каждом шаге: среднеквадратичная невязка  $< 10^{-4}$ .

Расчёт выполнялся в нестационарной постановке до полного выгорания смеси и стабилизации поля давления (физическое время моделирования до  $1,5 \text{ с}$ ) на рабочей станции Intel Xeon Gold 6258R (28 ядер,  $2,7 \text{ ГГц}$ ),  $256 \text{ ГБ ОЗУ}$ .

*Верификация модели.*

Достоверность расчётов оценивается путём сопоставления с независимыми данными трёх видов:

- расчётная нормальная скорость ламинарного фронта ( $0,38 \text{ м/с}$ ) согласуется с литературными данными для стехиометрической гептан-воздушной смеси при  $300 \text{ К}$  ( $0,35\text{--}0,42 \text{ м/с}$ ) [15];
- адиабатическая температура продуктов в расчёте ( $2\,250\text{--}2\,300 \text{ К}$  при атмосферном давлении) не превышает  $5 \%$  относительного отклонения от термодинамических расчётов;

– расчётное максимальное давление у закрытого торца (4,2 атм) и характерное время горения ( $\sim 0,8$  с) качественно согласуются с экспериментально измеренным временем срабатывания макета устройства пожаротушения (0,23 с при оптимальных условиях: гептан, 220 В, время подготовки 60 с) с учётом того, что экспериментальное время срабатывания соответствует лишь начальной, наиболее интенсивной фазе нарастания давления [8].

### Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1–5 представлены профили поля температуры в меридиональном сечении трубы на пяти характерных стадиях процесса горения. Контурные карты температуры наглядно иллюстрируют последовательный переход от точечного очага воспламенения к квазиоднородному полю продуктов сгорания.



Рис. 1. Профиль поля температуры в меридиональном сечении трубы на стадии I (инициация горения,  $t \approx 0,01$  с) процесса горения

На стадии I (рис. 1) наблюдается формирование компактного локального очага высокотемпературных продуктов сгорания непосредственно у закрытого торца. Максимальная температура в очаге составляет 1 653 К при полностью холодной ( $T = 300$  К) остальной части трубы (характерное синее окрашивание подавляющей части расчётной области). На данном этапе теплоперенос от очага в прилегающую смесь осуществляется преимущественно молекулярной теплопроводностью, конвективные эффекты при этом пренебрежимо малы. Скорость распространения фронта соответствует ламинарному режиму ( $\sim 0,4$  м/с).



Рис. 2. Профиль поля температуры в меридиональном сечении трубы на стадии II (развитие горения у закрытого торца,  $t \approx 0,10$ – $0,15$  с) процесса горения

На стадии II фронт пламени интенсивно развивается у закрытого торца. Максимальная температура в зоне реакции возрастает до 4 884 К, что существенно превышает адиабатическую температуру горения при стандартных условиях (~2 270 К). Столь высокое значение объясняется двумя взаимодополняющими факторами. С одной стороны, расширяющиеся продукты сгорания создают волну сжатия, многократно отражающуюся от закрытого торца. Адиабатическое сжатие от атмосферы до давления ~5 атм повышает температуру горящего газа дополнительно на величину:

$$\Delta T = T_0 \left[ \left( \frac{P}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \approx 300 \cdot (5^{0,286} - 1) \approx 278 \text{ К.}$$

С другой стороны, суммарное тепловыделение и жёсткое сжатие у стенки создают локальный «горячий карман» с температурой, значительно превышающей адиабатическую для открытой системы. Левая (открытая) часть трубы продолжает оставаться холодной на уровне 2 000–2 600 К – здесь находится не прогоревшая смесь, вытесняемая к открытому торцу.

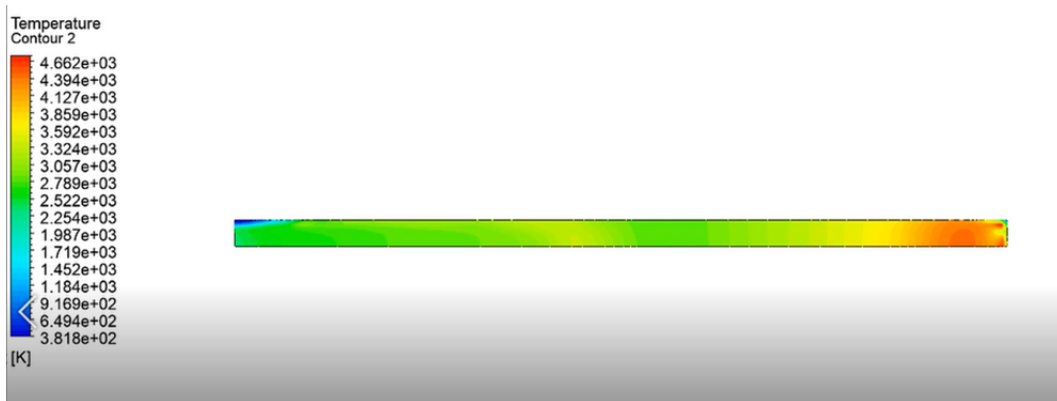


Рис. 3. Профиль поля температуры в меридиональном сечении трубы на стадии III (активное распространение фронта,  $t \approx 0,25-0,35$  с) процесса горения

На стадии III фронт пламени перемещается от закрытого торца в сторону открытого. Максимальная температура составляет 4 662 К, выражен существенный градиент по оси трубы – у закрытого торца (правая часть) сосредоточена зона наиболее горячих продуктов (> 4 000 К), у открытого торца (левая часть) температура ниже (~382 К), что соответствует зоне холодной не прогоревшей смеси. На данной стадии реализуется ключевой газодинамический механизм – эффект Шелкина, когда расширение продуктов сгорания создаёт ускоренное течение смеси к открытому торцу, которое турбулизует фронт пламени, увеличивает его эффективную площадь и экспоненциально нарастает скорость горения. Скорость потока не прогоревшей смеси перед фронтом достигает нескольких десятков метров в секунду.

На стадии IV фронт пламени приближается к открытому торцу, максимальная температура снизилась до 4 308 К вследствие начала истечения горячих продуктов через открытый торец и частичного охлаждения ближайших к нему слоёв. Наблюдается устойчивый осевой градиент давления: у закрытого торца давление максимально, у открытого – близко к атмосферному вследствие истечения. Именно данная стадия является с практической точки зрения ключевой, когда перепад давления между полостями устройства пожаротушения достигает максимума, формируя наиболее мощный вытесняющий импульс. Поле температуры демонстрирует чёткий осевой градиент, характерный для частично выгоревшей трубы.

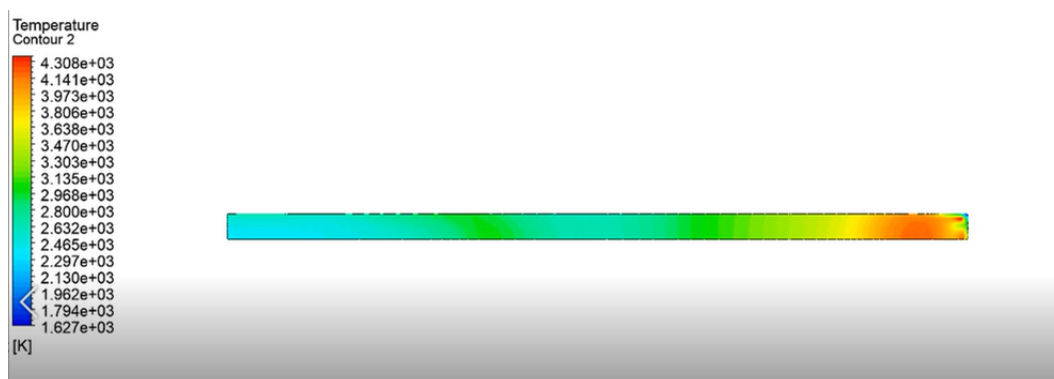


Рис. 4. Профиль поля температуры в меридиональном сечении трубы на стадии IV (приближение фронта к открытому торцу,  $t \approx 0,40\text{--}0,50$  с) процесса горения

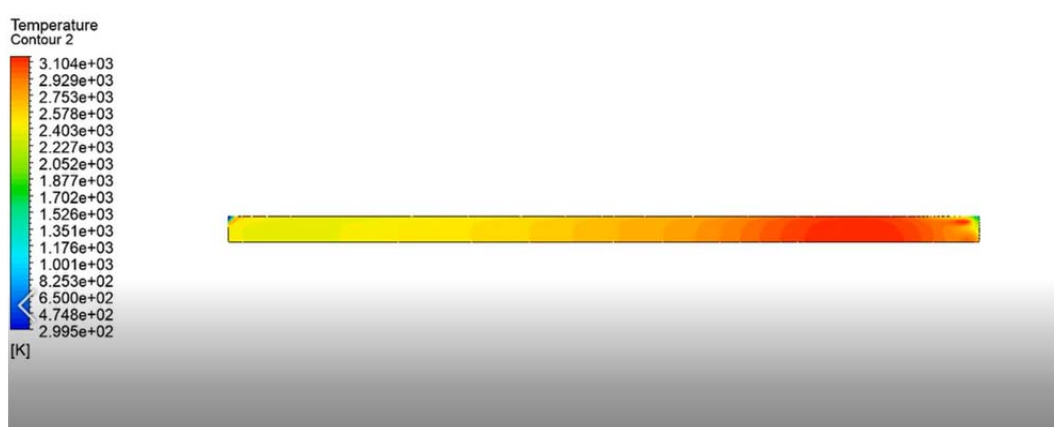


Рис. 5. Профиль поля температуры в меридиональном сечении трубы на стадии V (завершение горения,  $t \approx 0,70\text{--}0,85$  с) процесса горения

На стадии V вся горючая смесь выгорела и продукты сгорания заполняют трубу. Температура близка к квазиоднородному распределению 3 100 K в основном объеме трубы, у открытого торца – несколько ниже (300 K) вследствие поступления атмосферного воздуха и охлаждения истекающих газов. Давление релаксирует к атмосферному. Данная стадия соответствует завершению рабочего цикла газогенерации.

*Динамика нарастания давления.*

Зависимость давления от времени у закрытого торца трубы характеризует энергетику рабочего процесса (таблица).

Таблица

#### Основные газодинамические параметры рабочего процесса

Параметр	Значение
Время достижения $P_{\max}$ , с	0,82
Максимальное давление $P_{\max}$ , атм	4,2
Средняя скорость нарастания $dP/dt$ , атм/с	5,1
Начальная скорость ламинарного фронта пламени, м/с	~0,40
Время полного выгорания смеси, с	~0,85
Максимальная температура в зоне реакции, К	4 884
Температура продуктов на завершающей стадии, К	~3 100

Нарастание давления носит нелинейный характер, когда в начальной фазе (стадии I–II) темп нарастания невысок, поскольку объём активной зоны горения мал; на стадиях III–IV темп резко усиливается вследствие увеличения площади фронта пламени и включения в реакцию всё большего объёма смеси. Таким образом, зависимость  $dP/dt$  принимает характерный экспоненциальный вид.

Многочисленное отражение волн сжатия от закрытого торца создаёт пульсирующий характер давления, когда на медленно нарастающий тренд накладываются высокочастотные акустические колебания с периодом:

$$\tau = \frac{2L}{c} \approx 2 \cdot \frac{0,5}{340} \approx 2,9 \text{ мс.}$$

Одновременно у открытого торца формируется волна разрежения, распространяющаяся в сторону закрытого торца и снижающая давление в освобождённой от реагентов зоне.

*Механизм ускорения фронта пламени.*

Начальная скорость ламинарного фронта в рассматриваемых условиях составляет  $\sim 0,4$  м/с. По мере продвижения фронта к открытому торцу её значение нарастает вследствие эффекта Шелкина. Минимальная оценка скорости газового потока перед фронтом при ламинарном режиме:

$$u_{gas} = S_L \cdot (E - 1),$$

где  $S_L \approx 0,4$  м/с – нормальная скорость горения;  $E \approx 7,5$  – объёмный коэффициент расширения. Отсюда  $u_{gas} \approx 0,4 \cdot 6,5 \approx 2,6$  м/с. Это лишь начальная оценка, что по мере нарастания турбулентности и возрастания скорости фронта  $u_{gas}$  экспоненциально увеличивается.

В рассматриваемой конфигурации ( $L = 500$  мм) скорость фронта к моменту достижения открытого торца соответствует дефлаграционному режиму. Вместе с тем описанный механизм суммарно обеспечивает нарастание скорости фронта на два порядка величины – от 0,4 до десятков сотен метров в секунду, что является главным фактором формирования высокоамплитудного импульса давления в полости.

*Истечение горячих газов из открытого торца.*

По мере приближения фронта к открытому торцу горячие продукты сгорания начинают вытекать в атмосферу. Параметры истечения определяются перепадом давления между полостью и атмосферой:

$$u_{exit} \leq c_{cr} = \sqrt{\frac{\gamma R T_{pr}}{M}}.$$

Для горячих продуктов сгорания ( $T_{pr} \approx 2\,200$  К,  $M \approx 28$  г/моль,  $\gamma \approx 1,25$ ) критическая скорость звука составляет  $c_{cr} \approx 985$  м/с. При давлении в полости  $\sim 4$  атм и атмосферном давлении у выхода выполняется условие критического режима истечения (перепад давления  $> 1,87$ ), то есть горячие газы вытекают из открытого торца со звуковой скоростью. Именно этот динамический напор и формирует механическую основу импульса вытеснения ОТВ в конструкции устройства пожаротушения.

*Ограничения модели и оценка погрешности.*

Применение упрощённой одностадийной кинетической схемы вместо разветвлённого детального механизма горения гептана вносит погрешность в расчёт скорости фронта пламени порядка 15–20 %. Адиабатическая температура горения при этом воспроизводится с точностью  $\sim 5$  %. Допущение адиабатических стенок оправдано на рассматриваемых

временных масштабах ( $< 1$  с), когда тепловой слой на стенке трубы не успевает развиться глубже нескольких десятых долей миллиметра, а его влияние на интегральные потоки тепла пренебрежимо мало. Не учитываются излучательные потери тепла из зоны горения. Перечисленные упрощения являются стандартными для CFD-моделирования горения подобного класса и обеспечивают разумный баланс между точностью и вычислительными затратами [14, 19].

### Заключение

В результате численного исследования нестационарных газодинамических процессов горения стехиометрической гептан-воздушной смеси в полужакрытой цилиндрической трубе получены следующие основные результаты.

1. Разработана и реализована в программном комплексе ANSYS Fluent математическая модель, адекватно воспроизводящая физические механизмы рабочего процесса устройства пожаротушения импульсного действия: ламинарное иницирование горения у закрытого торца, нарастание турбулентности, формирование и отражение волн давления, истечение горячих газов через открытый торец.

2. Получена детальная визуализация пространственно-временного распределения температуры на пяти стадиях процесса. Установлено, что температура в зоне реакции последовательно проходит через значения от 1 653 К (инициация), 4 884 К (развитое горение у закрытого торца), 4 662–4 308 К (распространение и выход фронта) до  $\sim 3$  100 К (завершение). Высокие температуры на промежуточных стадиях объясняются суперпозицией экзотермического теплового эффекта реакции и компрессионного нагрева от отражённых волн сжатия.

3. Определены базовые газодинамические характеристики процесса: максимальное давление у закрытого торца  $\sim 4,2$  атм при средней скорости нарастания  $\sim 5,1$  атм/с. Установлено, что ускорение фронта пламени реализуется по механизму Шелкина, а истечение горячих продуктов через открытый торец происходит в критическом (звуковом) режиме, что обеспечивает высокий баллистический потенциал конструкции.

4. Полученные результаты представляют базовый уровень для оценки эффективности конструктивных мер по интенсификации процесса горения и формируют граничные условия для последующего численного моделирования газодинамики выброса с учётом турбулизирующих элементов.

Перспективы дальнейших исследований связаны с применением редуцированных детальных механизмов химической кинетики окисления гептана, учётом теплоотдачи в стенки и сравнительным анализом влияния различных геометрических конфигураций внутриполостных вставок на параметры формируемого импульса давления.

### Список источников

1. Комплексная оценка эффективности переносных устройств пожаротушения тонкораспыленной водой / В.Г. Агеев [и др.] // Научный вестник НИИГД Респиратор. 2024. № 1 (61). С. 7–16. EDN CUJXNP.

2. Куприн Д.С., Поляков А.С. Об эффективности переносных огнетушителей при тушении твердых горючих материалов автомобилей // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2020. № 4. С. 32–39. EDN ERKXKJ.

3. Совершенствование устройства для автоматического пожаротушения в помещениях стоянки и хранения автомобилей / Е.Ю. Захаров [и др.] // Научно-исследовательские публикации. 2024. № 4. С. 7–10. EDN GATNYB.

4. Кицак А.И. Эффективность тушения пожара струйными системами порошкового пожаротушения в условиях нестационарности процессов теплообмена и гетерогенного ингибирования частицами порошка активных центров пламени // Пожаровзрывобезопасность. 2020. Т. 29. № 5. С. 89–99. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.89-99

5. A Novel Environmental-Friendly Gel Dry-Water Extinguishant Containing Additives with Efficient Combustion Suppression Efficiency / Zh. Han [et al.] // *Fire Technology*. 2020. Vol. 56. № 6. P. 2365–2385. DOI: 10.1007/s10694-020-00957-3
6. Исаева Н.В., Новоселов С.В., Колобов В.А. Разработка и применение технологии производства системы порошкового пожаротушения с газогенерирующим устройством // *Проблемы техносферной безопасности: сб. статей VI Междунар. науч.-практ. конф.* Барнаул, 2024. С. 12–20. EDN PXAYWX.
7. Кочетов О.С. Автоматическое устройство пожаротушения в закрытых помещениях // *Теории, школы и концепции устойчивого развития науки в современных условиях: сб. статей Междунар. науч.-практ. конф.* Челябинск, 2022. С. 34–37. EDN XVVVWB.
8. Сытдыков М.Р., Кожевин Д.Ф., Иванов А.В. Оценка способов вытеснения огнетушащих веществ из средств пожаротушения, предназначенных для тушения углеводородов // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2022. № 2 (62). С. 154–163.
9. Numerical Study of the Effect of Primary Nozzle Geometry on Supersonic Gas-Solid Jet of Bypass Injected Dry Powder Fire Extinguishing Device / L. Zhang [et al.] // *Fire*. 2024. Vol. 7. № 2. P. 45. DOI: 10.3390/fire7020045
10. Ultra-fine powder extinguishing agent concentration measurement based on extinction method / W. Ma [et al.] // *Optical Engineering*. 2021. Vol. 60. № 09. DOI: 10.1117/1.oe.60.9.094110
11. Numerical simulation of ultra-fine powder extinguishing agent injection process / W. Ma [et al.] // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2023. Vol. 237. № 24. P. 5897–5910. DOI: 10.1177/09544062231167759
12. Разработка конструкции устройства пожаротушения порошковыми составами / М.М. Журов [и др.] // *Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация*. 2023. № 1 (53). С. 62–69. EDN EUESPZ.
13. Ходакова Т.Д., Кочетов О.С., Стареева М.М. Порошковые самосрабатывающие огнетушители для автоматических устройств пожаротушения // *Инновационные исследования: опыт, проблемы внедрения результатов и пути решения: сб. статей Всерос. науч.-практ. конф.* Стерлитамак, 2022. С. 93–95. EDN EUHGVP.
14. Прохоренко К.В., Серебренников С.Ю., Боровков И.А. Противопожарная защита взрывопожароопасных объектов по перекачке жидкости и газа // *Нефть. Газ. Новации*. 2021. № 5 (246). С. 76–80. EDN ESDBUQ.
15. Шилов А.Г. Методика тушения пожаров мобильной установкой пожаротушения с вытеснением огнетушащего вещества газопоршневым способом: дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2024. 202 с.
16. Yan L., Wang N., Xu Zh. Experimental Study on the Effectiveness and Safety of Cement Powder on Extinguishing Metal Magnesium Fire Based on Pneumatic Conveying Technology // *Social Science Research Network*. 2022. DOI: 10.2139/ssrn.4117065
17. Experimental investigation of the performance of modified expanded graphite powder doped with zinc borate in extinguishing sodium fires / X. Yu [et al.] // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2023. Vol. 84. P. 105110. DOI: 10.1016/j.jlp.2023.105110
18. Experimental study of flame extinguishing of red pine wood pyrolysis gas by NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> powder based on Cup-burner / H. Li [et al.] // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023. Vol. 41. P. 102675. DOI: 10.1016/j.csite.2022.102675
19. Simulation research on interaction rules between superfine powder extinguishing agent and fire plume / D.Y. Xu [et al.] // *2013 International Conference on Performance-based Fire and Fire Protection Engineering*. Wuhan, 2014. P. 87–94. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.04.012
20. Molkov V. *Fundamentals of Hydrogen Safety Engineering*. bookboon.com, 2012. 278 p.

## References

1. Kompleksnaya ocenka effektivnosti perenosnyh ustrojstv pozharotusheniya tonkoraspylennoj vodoj / V.G. Ageev [i dr.] // Nauchnyj vestnik NIIGD Respirator. 2024. № 1 (61). S. 7–16. EDN CUJXNP.
2. Kuprin D.S., Polyakov A.S. Ob effektivnosti perenosnyh ognetchitelej pri tushenii tverdyh goryuchih materialov avtomobilej // Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii». 2020. № 4. S. 32–39. EDN ERKXKJ.
3. Sovershenstvovanie ustrojstva dlya avtomaticheskogo pozharotusheniya v pomeshcheniyah stoyanki i hraneniya avtomobilej / E.Yu. Zaharov [i dr.] // Nauchno-issledovatel'skie publikacii. 2024. № 4. S. 7–10. EDN GATNYB.
4. Kicak A.I. Effektivnost' tusheniya pozhara strujnymi sistemami poroshkovogo pozharotusheniya v usloviyah nestacionarnosti processov teploobmena i geterogennogo ingibirovaniya chasticami poroshka aktivnyh centrov plameni // Pozharovzryvobezopasnost'. 2020. T. 29. № 5. S. 89–99. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.89-99
5. A Novel Environmental-Friendly Gel Dry-Water Extinguishant Containing Additives with Efficient Combustion Suppression Efficiency / Zh. Han [et al.] // Fire Technology. 2020. Vol. 56. № 6. P. 2365–2385. DOI: 10.1007/s10694-020-00957-3
6. Isaeva N.V., Novoselov S.V., Kolobov V.A. Razrabotka i primenenie tekhnologii proizvodstva sistemy poroshkovogo pozharotusheniya s gazogeneriruyushchim ustrojstvom // Problemy tekhnosfernoj bezopasnosti: sb. statej VI Mezhdunar. nauch.-prakt.konf. Barnaul, 2024. S. 12–20. EDN PXAYWX.
7. Kochetov O.S. Avtomaticheskoe ustrojstvo pozharotusheniya v zakrytyh pomeshcheniyah // Teorii, shkoly i koncepcii ustojchivogo razvitiya nauki v sovremennyh usloviyah: sb. statej Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Chelyabinsk, 2022. S. 34–37. EDN XVVVWB.
8. Sytdykov M.R., Kozhevnikov D.F., Ivanov A.V. Ocenka sposobov vytesneniya ognetchashchih veshchestv iz sredstv pozharotusheniya, prednaznachennyh dlya tusheniya uglevodorodov // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2022. № 2 (62). S. 154–163.
9. Numerical Study of the Effect of Primary Nozzle Geometry on Supersonic Gas-Solid Jet of Bypass Injected Dry Powder Fire Extinguishing Device / L. Zhang [et al.] // Fire. 2024. Vol. 7. № 2. P. 45. DOI: 10.3390/fire7020045
10. Ultra-fine powder extinguishing agent concentration measurement based on extinction method / W. Ma [et al.] // Optical Engineering. 2021. Vol. 60. № 09. DOI: 10.1117/1.oe.60.9.094110
11. Numerical simulation of ultra-fine powder extinguishing agent injection process / W. Ma [et al.] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2023. Vol. 237. № 24. P. 5897–5910. DOI: 10.1177/09544062231167759
12. Razrabotka konstrukcii ustrojstva pozharotusheniya poroshkovymi sostavami / M.M. Zhurov [i dr.] // Chrezvychajnye situacii: preduprezhdenie i likvidaciya. 2023. № 1 (53). S. 62–69. EDN EUESPZ.
13. Hodakova T.D., Kochetov O.S., Stareeva M.M. Poroshkovye samosrabatyvayushchie ognetchiteli dlya avtomaticheskikh ustrojstv pozharotusheniya // Innovacionnye issledovaniya: opyt, problemy vnedreniya rezul'tatov i puti resheniya: sb. statej Vseros. nauch.-prakt. konf. Sterlitamak, 2022. S. 93–95. EDN EUHGVP.
14. Prohorenko K.V., Serebrennikov S.Yu., Borovkov I.A. Protivopozharnaya zashchita vzryvopozharoopasnyh ob'ektov po perekachke zhidkosti i gaza // Neft'. Gaz. Novacii. 2021. № 5 (246). S. 76–80. EDN ESDBUQ.
15. Shilov A.G. Metodika tusheniya pozharov mobil'noj ustanovkoj pozharotusheniya s vytesneniem ognetchashchego veshchestva gazoporshnevym sposobom: dis. ... kand. tekhn. nauk. SPb, 2024. 202 s.
16. Yan L., Wang N., Xu Zh. Experimental Study on the Effectiveness and Safety of Cement Powder on Extinguishing Metal Magnesium Fire Based on Pneumatic Conveying Technology // Social Science Research Network. 2022. DOI: 10.2139/ssrn.4117065

17. Experimental investigation of the performance of modified expanded graphite powder doped with zinc borate in extinguishing sodium fires / X. Yu [et al.] // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2023. Vol. 84. P. 105110. DOI: 10.1016/j.jlp.2023.105110

18. Experimental study of flame extinguishing of red pine wood pyrolysis gas by  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  powder based on Cup-burner / H. Li [et al.] // Case Studies in Thermal Engineering. 2023. Vol. 41. P. 102675. DOI: 10.1016/j.csite.2022.102675

19. Simulation research on interaction rules between superfine powder extinguishing agent and fire plume / D.Y. Xu [et al.] // 2013 International Conference on Performance-based Fire and Fire Protection Engineering. Wuhan, 2014. P. 87–94. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.04.012

20. Molkov V. Fundamentals of Hydrogen Safety Engineering. bookboon.com, 2012. 278 p.

#### **Информация о статье:**

Статья поступила в редакцию: 06.02.2026; одобрена после рецензирования: 26.03.2026; принята к публикации: 27.03.2026

#### **Information about the article:**

The article was submitted to the editorial office: 06.02.2026; approved after review: 26.03.2026; accepted for publication: 27.03.2026

#### *Информация об авторах:*

**Иванов Андрей Владимирович**, старший преподаватель кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: [andrei-ivanov84@mail.ru](mailto:andrei-ivanov84@mail.ru), <http://orcid.org/0000-0001-7886-2039>

#### *Information about authors:*

**Ivanov Andrey V.**, senior lecturer of the department of fire, emergency rescue equipment and automotive industry of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: [andrei-ivanov84@mail.ru](mailto:andrei-ivanov84@mail.ru), <http://orcid.org/0000-0001-7886-2039>